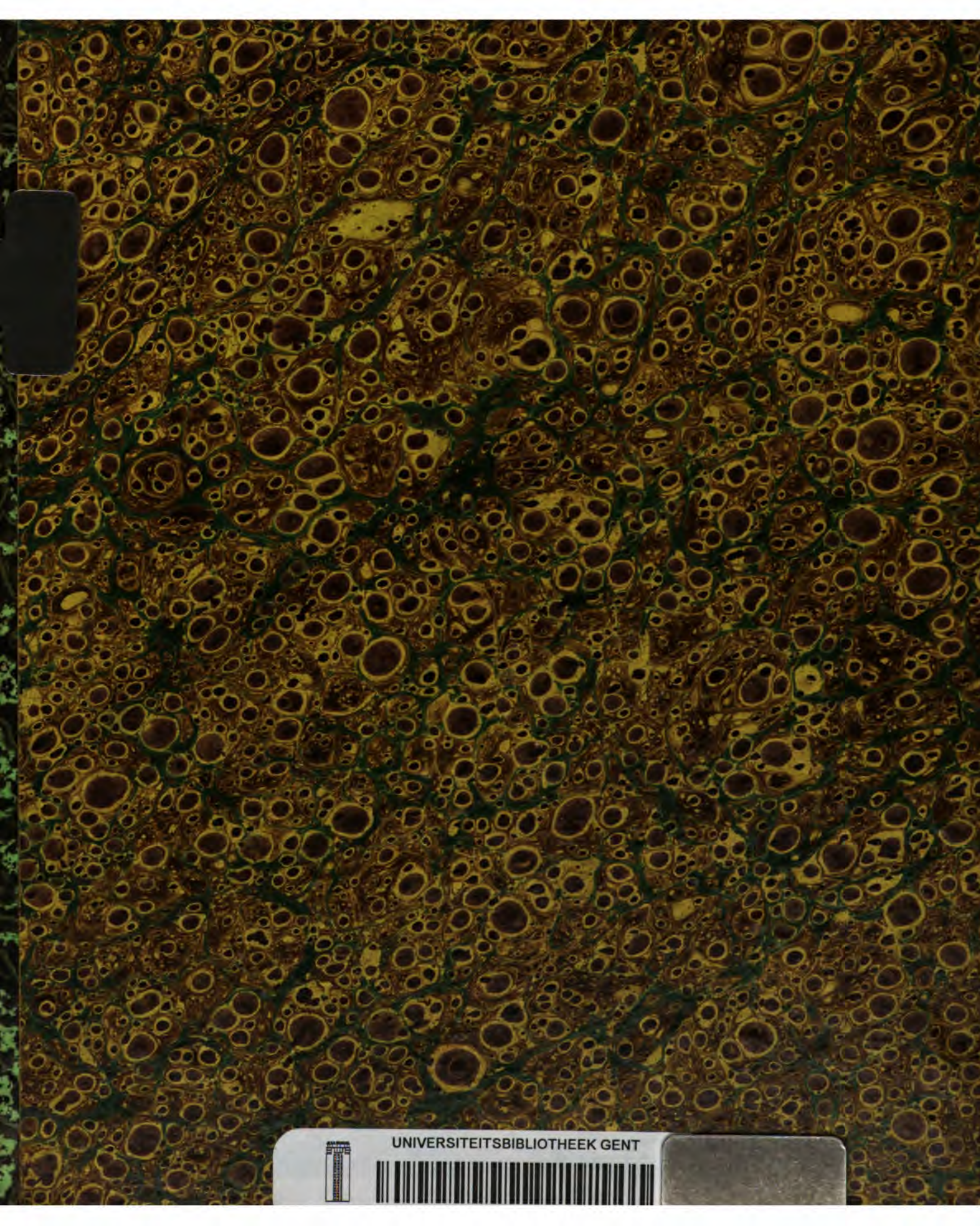
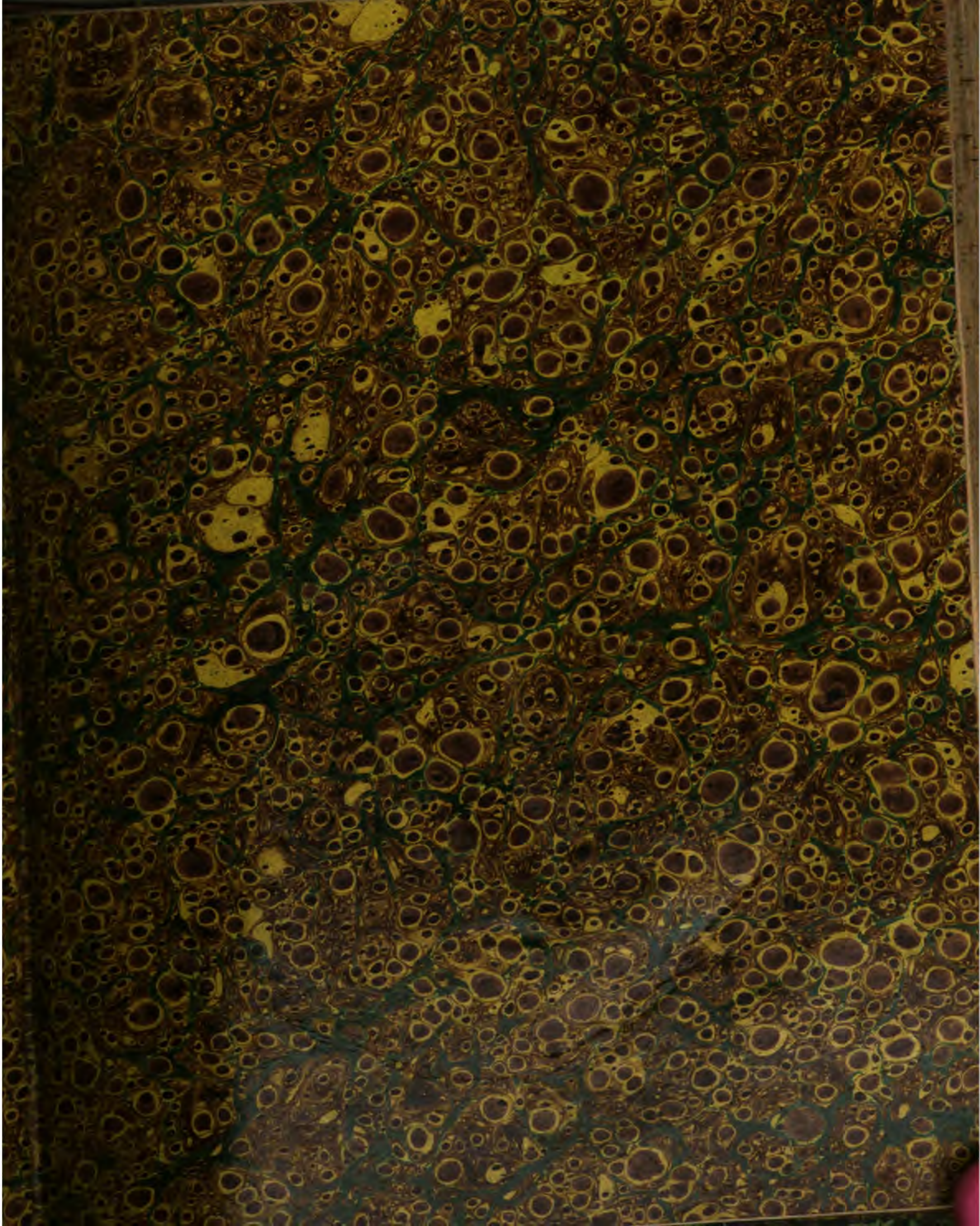



UNIVERSITEITSBIBLIOTHEEK GENT



THÉORIE

DES

MACHINES A VAPEUR.

IMPRIMERIE DE J. DESOER, A LIÉGE.

THÉORIE

DES

MACHINES A VAPEUR

OUVRAGE

Destiné à prouver l'inexactitude des Méthodes en usage

POUR ÉVALUER LES EFFETS OU LES PROPORTIONS DES MACHINES A VAPEUR, ET A Y SUBSTITUER UNE SÉRIE DE FORMULES ANALYTIQUES PROPRES A DÉTERMINER LA VITESSE D'UNE MACHINE DONNÉE SOUS UNE CHARGE CONNUE, SA CHARGE POUR UNE VITESSE FIXÉE, SA VAPORISATION POUR DES EFFETS VOULUS, SA FORCE EN CHEVAUX, SON EFFET UTILE POUR UNE CONSOMMATION CONNUE D'EAU ET DE COMBUSTIBLE, LA CHARGE OU LA DÉTENTE QU'IL FAUT LUI DONNER POUR LUI FAIRE PRODUIRE SON MAXIMUM D'EFFET UTILE, ETC., ETC.;

SUIVI D'UN

APPENDICE

CONTENANT DE COURTES NOTIONS DESTINÉES AUX PERSONNES PEU FAMILIARISÉES AVEC LES SIGNES ALGÉBRIQUES, ET AYANT POUR BUT DE LEUR RENDRE PARFAITEMENT CLAIR ET FACILE L'USAGE DES FORMULES;

PAR LE COMTE F. M. G. DE PAMBOUR

Ancien Élève de l'École Polytechnique, ancien Officier aux corps royaux de l'Artillerie et de l'État-Major,
Membre correspondant de l'Académie royale des Sciences de Berlin, etc.

TROISIÈME ÉDITION

Augmentée d'un Atlas de 24 planches et de la description des divers systèmes de machines à vapeur en usage, d'après les dessins originaux des premiers constructeurs anglais.

LIÉGE

D. AVANZO ET COMP^e., ÉDITEURS.

1843

INTRODUCTION.

Dans le *Traité des Locomotives*, dont la première édition française parut au commencement de 1835, nous avons exposé les bases d'une nouvelle théorie de la machine à vapeur. Nous nous sommes alors contenté d'en faire l'application aux machines locomotives, parce que le sujet nous y contraignait ; mais nous avons annoncé, toutefois, que cette théorie n'était pas moins nécessaire pour calculer avec exactitude, soit les effets, soit les proportions des autres machines à vapeur de tout genre et de tout système.

Aussitôt après la publication de ce Traité, la théorie dont nous parlons fut adoptée dans plusieurs ouvrages. Un illustre membre de l'Institut, dont les sciences ont eu depuis à déplorer la perte, M. Navier, qui venait de publier, dans les *Annales des Ponts et Chaussées* de 1835, un Mémoire sur l'emploi des machines locomotives, reprit immédiatement ce travail, et présenta, en 1836, dans le même Recueil scientifique, un nouveau Mémoire, dans lequel il reconnaissait l'exactitude de la théorie que nous venions d'introduire, et où il abandonnait, en conséquence, les procédés ordinaires de calcul pour leur substituer les nôtres. Le professeur anglais Whewell, dont le nom est bien connu dans les sciences, inséra de même les principes de cette théorie dans la 5e. édition de son *Traité de Mécanique ;* plusieurs ingénieurs en firent la base de leurs calculs pour l'établissement des machines locomotives sur les chemins de fer qu'ils proposaient ; et, enfin, M. Wood, dans la 3e. édition de son *Traité sur les chemins de fer*, Londres, 1838, l'adopta également (pages 555-577), sans mentionner, il est vrai, dans le cours de l'ouvrage, la source où il l'a puisée, mais en réparant

ensuite cet oubli dans une note spéciale, ajoutée en tête du livre après son impression.

Cependant, nous n'avions encore développé cette théorie que dans son application aux locomotives, et elle n'avait été considérée par ceux qui l'avaient admise après nous, que comme une théorie spécialement propre à ces machines. Il restait donc d'abord à la démontrer d'une manière générale, et ensuite à l'appliquer aux diverses espèces de machines en usage. Mais comme, dans les locomotives, l'action de la vapeur est extrêmement simple, puisqu'on n'y emploie ni la détente ni la condensation, et qu'en outre ces machines sont à mouvement continu, il restait beaucoup à faire pour établir les formules convenables à tous les autres systèmes de machines à vapeur. Tel fut le but d'une série de Mémoires que nous présentâmes à l'Académie des Sciences de l'Institut, dès le commencement de 1837, et auxquels ce corps illustre voulut bien accorder son approbation, en reconnaissant que la priorité nous appartenait relativement à la théorie en question.

Ce sont ces travaux que nous publions en ce moment, après leur avoir donné le développement dont ils nous ont paru susceptibles. Nous commencerons donc cet ouvrage par des preuves de l'inexactitude de la théorie employée avant nous; ensuite, nous passerons au développement des principes qui règlent l'action mécanique de la vapeur; puis, nous exposerons la théorie analytique de la machine à vapeur, prise dans sa généralité; et, enfin, dans des chapitres spéciaux, nous montrerons l'application particulière de cette théorie à tous les divers systèmes de machines en usage. Dans cette dernière partie de l'ouvrage, se trouveront traités différens problèmes dont la solution n'était pas encore acquise à la science, comme : le moyen de déterminer le frottement propre des machines; le calcul de la vitesse du piston pour une charge donnée, qui était resté impossible dans la théorie ordinaire; la détermination de la charge et de la détente qu'il faut donner à une machine pour lui faire produire son maximum d'effet utile; la recherche du contre-poids correspondant au maximum d'effet utile dans les machines à simple action et dans les machines atmosphériques, etc. Du reste, on remarquera

qu'à l'exception d'une partie du chapitre II, concernant quelques lois connues sur les propriétés de la vapeur, tout le reste de l'ouvrage résulte exclusivement de la théorie proposée, et, par conséquent, se trouve entièrement neuf.

Pour faire de cet ouvrage un traité pratique, il aurait fallu y joindre une série d'expériences propres à déterminer la valeur précise du frottement des machines et des autres constantes qui figurent dans les formules. Mais nous avons cru pouvoir nous arrêter, pour l'instant, à ce qui forme la *théorie* proprement dite des machines à vapeur, et c'est pourquoi nous avons conservé ce titre à l'ouvrage. Plus tard, nous comptons y ajouter ce complément important; mais, on verra du moins, par les exemples de calcul que nous donnons pour chaque machine, que les déterminations approximatives dont nous nous sommes servi pour les constantes, peuvent déjà conduire à des résultats suffisamment exacts pour les besoins ordinaires de la pratique; et, du reste, le frottement est si peu de chose dans les machines bien faites, qu'une détermination plus précise à cet égard ne pourra jamais produire que de bien faibles changemens dans les résultats.

La manière incorrecte dont on a calculé jusqu'ici les effets ou les proportions des machines à vapeur nous paraît la cause principale de ces désappointemens continuels éprouvés à l'essai des machines, et des procès qui en ont été la suite entre les acquéreurs et les constructeurs de machines. On croyait pouvoir assigner d'avance les effets que produirait une machine en construction; mais l'expérience démontrait bientôt qu'on ne pouvait être assuré de remplir un but déterminé qu'autant que la machine était exactement calquée sur une autre déjà éprouvée, et que, dans tout autre cas, on restait dans le vague sur ses effets réels. Si donc, dans la crainte de livrer une machine trop faible, on lui donnait à dessein un excès de force, il arrivait qu'étant mal proportionnée pour son ouvrage, elle ne travaillait point avec toute l'économie à laquelle on s'était attendu; et si, au contraire, elle se trouvait trop faible, alors elle était incapable d'exécuter la tâche qui lui était imposée, et il fallait renoncer à son emploi; ou bien,

reconnaissant l'insuffisance de la machine, ceux qui étaient chargés de la conduire cherchaient à suppléer à son manque de force en augmentant la pression dans la chaudière, c'est-à-dire en chargeant ou même en fixant tout-à-fait les soupapes de sûreté, et alors de terribles explosions en étaient souvent le résultat. C'est ainsi que, sur des bateaux à vapeur trop faibles pour remonter les courans sur lesquels ils devaient naviguer, la vie d'un grand nombre de personnes a été compromise.

D'un autre côté, les calculs analytiques par lesquels nous remplaçons les méthodes anciennes sont réduits à des formes si simples, qu'ils ne peuvent offrir le moindre embarras dans les applications, et nous n'avons pas craint de nous exposer à quelques répétitions pour en rendre l'usage encore plus clair et plus commode. Nous pensons donc que ces recherches pourront convenir également aux ingénieurs et aux praticiens, et l'importance du sujet nous fait espérer qu'elles pourront rendre quelque service.

Cette édition a été augmentée; nous y avons joint une représentation et une description détaillée de chaque espèce de machine à vapeur en usage, d'après les dessins originaux des premiers constructeurs anglais. Les noms bien connus de MM. W. Fairbairn, de Manchester; Fawcett et Preston, de Liverpool; B. Hick, de Bolton; R. Stephenson, de Newcastle; W. West, de Cornwall, etc., nous sont un sûr garant de l'utilité dont peuvent être ces dessins, dont quelques-uns représentent des systèmes de machines qui n'avaient pas été publiés jusqu'ici, et nous aimons à reconnaître l'empressement désintéressé avec lequel ils ont été mis à notre disposition. Nous espérons aussi que le public appréciera le talent de l'artiste qui a su les reproduire dans des gravures aussi heureuses par le fini que par la clarté.

L'emploi des mesures anglaises se rencontrant fréquemment dans cet ouvrage, nous joignons ici une table de leur transformation en mesures françaises. Les bases qui ont servi à la calculer sont extraites de l'*Annuaire du Bureau des Longitudes* pour 1844.

TABLE DE TRANSFORMATION

Des mesures anglaises en mesures françaises.

NOMBRES.	POUCES en centimètres.	PIEDS en mètres.	MILLES en kilomètres.	PIEDS CARRÉS en mètres carrés.
1	2.5400	0.3047945	1.6093	0.09290
2	5.0799	0.6095890	3.2186	0.18580
3	7.6199	0.9143835	4.8279	0.27870
4	10.1598	1.2197680	6.4373	0.37160
5	12.6998	1.5239724	8.0466	0.46450
6	15.2397	1.8287669	9.6559	0.55750
7	17.7797	2.1335614	11.2652	0.65030
8	20.3196	2.4383559	12.8745	0.74320
9	12.8596	2.7431504	14.4838	0.83610
10	25.4000	3.0479450	16.0930	1.92900

TABLE DE TRANSFORMATION

Des mesures anglaises en mesures françaises.

NOMBRES.	PIEDS CUBES en mètres cubes.	LIVRES en kilogrammes.	TONNES en tonneaux de 1000 kilogrammes.	LIVRES par pouce carré, en kilogrammes par centimètre carré.
1	0.028314	0.4534148	1.015649	0.0702774
2	0.056628	0.9068296	2.031298	0.1405548
3	0.084942	1.3602444	3.046947	0.2108322
4	0.113256	1.8136592	4.062596	0.2811096
5	0.141570	2.2670740	5.078245	0.3513870
6	0.169884	2.7204888	6.093894	0.4216644
7	0.198198	3.1739036	7.109543	0.4919418
8	0.226512	3.6273184	8.125192	0.5622192
9	0.254826	4.0807332	9.140841	0.6324966
10	0.283140	4.5341480	10.156490	0.7027740

TABLE DES MATIÈRES.

Pages.

CHAPITRE I.

PREUVES DE L'INEXACTITUDE DES MÉTHODES ORDINAIRES DE CALCUL.

CHAPITRE II.

DES LOIS QUI RÈGLENT L'ACTION MÉCANIQUE DE LA VAPEUR, ET DES APPAREILS EN USAGE POUR MESURER SA FORCE ÉLASTIQUE.

CHAPITRE III.

DESCRIPTION DES PRINCIPAUX APPAREILS DONT SE COMPOSENT LES MACHINES A VAPEUR.

CHAPITRE IV.

THÉORIE GÉNÉRALE DE LA MACHINE A VAPEUR.

CHAPITRE V.

MACHINES A HAUTE PRESSION, OU MACHINES A DOUBLE ACTION, A HAUTE PRESSION, SANS DÉTENTE ET SANS CONDENSATION.

CHAPITRE VI.

MACHINES LOCOMOTIVES.

CHAPITRE VII.

MACHINES DE WATT A DOUBLE ACTION, OU MACHINES A DOUBLE ACTION, A BASSE PRESSION ET A CONDENSATION, SANS DÉTENTE.

CHAPITRE VIII.

MACHINES DE CORNWALL A DOUBLE ACTION, OU MACHINES A DOUBLE ACTION, A HAUTE PRESSION, A DÉTENTE ET A CONDENSATION.

CHAPITRE IX.

MACHINES DE WOOLF, OU MACHINES A DOUBLE ACTION, A HAUTE PRESSION, A CONDENSATION ET A DÉTENTE DANS DEUX CYLINDRES.

CHAPITRE X.

MACHINES D'EVANS, OU MACHINES A DOUBLE ACTION, A HAUTE PRESSION, A DÉTENTE ET SANS CONDENSATION.

CHAPITRE XI.

MACHINES DE WATT A SIMPLE ACTION, OU MACHINES A SIMPLE ACTION, A BASSE PRESSION, A DÉTENTE ET A CONDENSATION.

CHAPITRE XII.

MACHINES DE CORNWALL A SIMPLE ACTION, OU MACHINES A SIMPLE ACTION, A HAUTE PRESSION, A DÉTENTE ET A CONDENSATION.

CHAPITRE XIII.

MACHINES ATMOSPHÉRIQUES.

APPENDICE.

THÉORIE

DE LA

MACHINE A VAPEUR.

CHAPITRE PREMIER.

PREUVES DE L'INEXACTITUDE DES MÉTHODES ORDINAIRES DE CALCUL.

§ I[er]. ***Mode de calcul ou théorie en usage jusqu'ici pour calculer l'effet des machines à vapeur, et objections qui se présentent d'abord contre son exactitude.***

Le but de cet ouvrage est de démontrer que le calcul des effets ou des proportions des machines à vapeur, tel qu'il est employé dans la pratique, ou indiqué par les auteurs qui ont traité ce sujet, est entièrement fautif, et de développer une théorie qui mène à des résultats plus exacts. Nous devons donc nécessairement consacrer le premier chapitre à prouver l'inexactitude des méthodes ordinaires de calcul, puis nous passerons successivement au développement de la théorie proposée et à son application aux divers systèmes de machines à vapeur en usage.

L'effet produit par une machine se compose de deux élémens : la résistance qu'elle met en mouvement et la vitesse qu'elle communique à cette résistance. Il en résulte que les calculs qui se présentent d'abord dans l'application des machines se rapportent aux deux problèmes suivans :

1°. La machine étant supposée construite, et la vitesse de son mouvement donnée, déterminer la résistance qu'elle pourra mouvoir ;

2°. La machine étant supposée construite, et la résistance qu'elle doit mouvoir étant connue, déterminer la vitesse qu'elle communiquera à cette résistance.

Ensuite, un troisième problème se présente encore, et il est la conséquence naturelle des deux premiers, savoir :

3°. La résistance à mouvoir étant connue, ainsi que la vitesse qu'il est nécessaire de lui communiquer, déterminer les dimensions qu'il convient d'adopter dans la construction de la machine pour qu'elle produise cet effet. Dans les machines à

vapeur, ce troisième problème revient à déterminer les dimensions de la chaudière, ou, si l'on veut, la vaporisation dont elle doit être capable, pour obtenir les effets voulus.

Ces trois problèmes forment la base de tout le calcul des machines à vapeur. Ils peuvent se modifier de diverses manières, et donner lieu à plusieurs questions dont nous nous occuperons plus loin ; mais la solution de ces questions dépendra toujours de celle des trois problèmes fondamentaux dont nous venons de parler. Ainsi, par exemple, trouver l'effet utile d'une machine dont on compte les coups de piston, c'est-à-dire dont on connaît la vitesse, revient à déterminer la résistance qu'elle peut mouvoir à cette vitesse, puisque, cette résistance une fois connue, il suffira de la multiplier par la vitesse donnée pour avoir l'effet utile cherché. La force en chevaux d'une machine, et son effet pour un poids donné de combustible, n'étant que l'effet utile de la machine rapporté à des unités particulières, savoir, la force d'un cheval comme force produite, ou la consommation d'une unité de combustible comme force appliquée, il est clair que ces questions retomberont dans celle de l'effet utile dont on vient de parler. C'est d'ailleurs ce qui se reconnaîtra facilement quand nous traiterons spécialement de ces questions.

Ainsi, toutes les recherches relatives aux machines à vapeur se traduisent, en définitive, dans les trois recherches que nous avons énoncées : trouver la charge, trouver la vitesse, trouver la vaporisation.

Le seul mode de calcul en usage jusqu'ici, pour connaître, soit l'effort dont est capable une machine à vapeur, soit l'effet utile qu'elle peut produire, est de faire d'abord le calcul en supposant que la vapeur agit dans le cylindre avec la même force élastique que dans la chaudière ; puis de réduire ensuite le résultat obtenu, dans une certaine proportion indiquée par un coefficient ou par une fraction constante. Cette méthode, que nous appellerons méthode des coefficiens, résulte de ce que, n'ayant aucun moyen de connaître *à priori* la pression de la vapeur dans le cylindre, on devait nécessairement la supposer d'abord égale à celle de la chaudière. Mais comme le résultat ainsi obtenu, et qu'on appelait résultat *théorique*, se trouvait toujours de beaucoup supérieur aux résultats *pratiques* auxquels on le comparait, on reconnaissait qu'une réduction était nécessaire.

La nécessité de cette réduction était attribuée à deux causes : 1°. à ce que, dans le calcul, on avait négligé le frottement de la machine, et la dépense inutile de vapeur qui a lieu à chaque coup de piston, par suite du remplissage des espaces vides exprimés sous le nom de *liberté du cylindre* ; 2°. à ce qu'on n'y avait pas tenu compte des pertes résultant des causes suivantes : le rétrécissement des passages, les coudes des conduits, le frottement de la vapeur dans les tuyaux, les fuites de vapeur et sa condensation partielle. Et comme ces causes paraissaient devoir agir d'une manière semblable, non-seulement dans la même machine, tant qu'on n'y fesait pas varier les passages de la vapeur, mais dans les machines d'un même système, on

jugeait qu'elles produiraient, sur le résultat définitif du calcul, une réduction proportionnée à sa valeur totale.

Par conséquent, on croyait pouvoir arriver au résultat réel, en réduisant le résultat théorique dans une certaine proportion constante. D'autre part, on jugeait aussi que le rapport des effets théoriques aux effets pratiques ne pouvait être le même dans les divers systèmes de machines à vapeur; on avait donc été conduit à admettre en outre un coefficient différent pour chaque système.

Ce mode était le plus naturel, et il était même le seul à suivre, tant qu'on n'avait pas de moyen de déterminer à l'avance quelle serait la pression réelle de la vapeur dans le cylindre, sous des conditions données. Aussi, quoique notre but soit de démontrer les erreurs qui résultent de l'application de ce calcul, et de le remplacer par un autre, nous sommes loin de vouloir déprécier les ouvrages où il se trouve développé. Sans doute on devait fort bien savoir que ce mode, par cela même qu'il consistait dans l'emploi d'un coefficient pour représenter en bloc des effets qui n'avaient jamais été l'objet d'un mesure directe, ne pouvait être qu'une approximation, qu'une méthode d'attente. On ne l'employait que comme on se sert d'un instrument mauvais, jusqu'à ce qu'on en ait un meilleur. Plusieurs des ouvrages où il est expliqué reconnaissent en même temps que la théorie de la machine à vapeur est encore inconnue ou imparfaitement étudiée. D'ailleurs, tous ces ouvrages ne traitent pas la question d'une manière entièrement semblable; ce qui fait que ce que nous allons dire ne pourrait s'adresser à tous également. Ainsi, nous desirons que l'on comprenne parfaitement que c'est pour établir l'exactitude de la méthode que nous allons proposer, et non pour attaquer d'autres écrits, que nous comparerons ensemble les deux calculs, lorsqu'il sera nécessaire.

Pour revenir à la méthode en usage, voici comment on procédait. On calculait l'effort appliqué sur le piston, en supposant la pression de la vapeur dans le cylindre égale à la pression dans la chaudière, c'est-à-dire, qu'on multipliait l'aire du piston par la pression de la chaudière, diminuée de celle de la vapeur non condensée sur la face opposée du piston, ce qui donnait l'effort appliqué par la machine; puis on multipliait cet effort par la vitesse du piston, et l'on avait ainsi l'effet *théorique* de la machine. Ensuite on comparait le résultat de ce calcul avec celui de quelques expériences faites sur des machines du même genre, et le rapport entre les résultats fournissait un coefficient fractionnaire, qu'on regardait comme le rapport constant entre les effets théoriques et les effets pratiques, pour toutes les machines du même système.

En supposant, par exemple, une machine à haute pression sans détente, et appelant a l'aire du cylindre, ω la pression effective de la vapeur par unité de surface dans la chaudière, et v la vitesse donnée du piston, $a\omega$ était l'effort exercé, et $a\omega v$ l'effet théorique qui devait se produire. Si donc l'expérience, au lieu de donner un effet égal à $a\omega v$, n'en avait donné, dans certains cas, qu'une fraction que nous

exprimerons par k, on admettait le coefficient k comme représentant le rapport constant entre les effets théorique et pratique. De sorte que l'effet utile d'une machine sans détente était représenté par

$$k a \omega v;$$

ou bien l'effort théorique de la machine étant exprimé par $a\omega$, son effort utile, ou la résistance que pouvait mouvoir le piston, était représenté par

$$a\mathrm{R} = k a \omega,$$

en exprimant par R cette résistance supposée, répartie par unité de la surface du piston.

Le coefficient, tel que nous venons de l'indiquer, s'appliquait à la pression *effective* ou utile de la vapeur dans la chaudière, c'est-à-dire, à la pression de la chaudière diminuée d'abord de la contre-pression due à la vapeur non condensée sur la face opposée du piston. Mais, au lieu de faire le calcul de cette manière, quelques auteurs indiquaient un coefficient applicable à la pression *absolue* de la vapeur dans la chaudière, c'est-à-dire à la pression prise avant toute déduction pour la vapeur non condensée. C'est la méthode suivie par l'auteur anglais Tredgold.

Les coefficiens indiqués par cet auteur, pour passer de la pression *absolue* de la vapeur dans la chaudière, à la portion de cette pression qui produit l'effet utile, étaient les suivans (Tredgold, *Traité de la machine à vapeur*, art. 367, 372, 383, 396, 402, 408, 411, 416, 426):

Machines sans condensation et sans détente.	0.60
Machines sans condensation et à détente (pendant l'admission de la vapeur dans le cylindre).	0.60
Machines sans condensation et à détente dans deux cylindres combinés (pendant l'admission de la vapeur dans le cylindre).	0.47
Machines à simple action, de Watt.	0.60
Machines à simple action et à détente (pendant l'admission de la vapeur dans le cylindre).	0.60
Machines rotatives ou à double action, de Watt.	0.63
Machines rotatives ou à double action et à deux cylindres combinés. . . .	0.48
Machines atmosphériques (coefficient à appliquer à la pression atmosphérique et comprenant une déduction pour la pression de la vapeur non condensée sur la face opposée du piston).	0.54
Machines atmosphériques, à condenseur séparé (coefficient à appliquer comme le précédent).	0.54 (*)

(*) En présence de toutes les explications données, et incessamment répétées par Tredgold, pour montrer comment on doit calculer l'effet utile des machines, *d'après la pression de la vapeur dans la chaudière*, en passant de celle-ci à la pression dans le cylindre, au moyen d'un coefficient, il est

Ces coefficiens, à l'exception des deux derniers, devaient être appliqués, ainsi que nous l'avons dit, à la pression *absolue* de la vapeur dans la chaudière (c'est-à-dire, sans déduction préliminaire de la pression atmosphérique ou de la pression de la vapeur non condensée contre la face opposée du piston). Ils étaient donc censés faire connaître d'abord le rapport entre la pression absolue *théorique* et la pression absolue *pratique* de la vapeur sur le piston. Ensuite, une fois cette dernière connue, pour en déduire la pression *utile pratique*, c'est-à-dire, l'effort définitif appliqué par la machine à la production de l'effet utile, il restait à retrancher du résultat précédent, soit la pression atmosphérique, soit la pression du condenseur, selon que la machine était sans condensation ou à condensation.

Cette méthode offrait donc quelque légère différence avec la précédente, mais cependant toutes deux pouvaient conduire au même résultat, si les coefficiens étaient choisis en conséquence; ainsi, par exemple, pour une machine à haute pression, sans condensation, travaillant à une pression *absolue* de 65 livres par pouce carré, ou à la pression *effective* de 50 livres par pouce carré, un coefficient 0.50, appliqué à la pression effective, donnait sensiblement le même résultat que le coefficient 0.60 appliqué à la pression absolue. Car l'effort utile par pouce carré, sur le piston, calculé par la première méthode, était

$$0.50 \times 50 = 25 \text{ livres};$$

et, calculé par la seconde, cet effort utile était

$$0.60 \times 65 - 15 = 24 \text{ livres}.$$

On conçoit d'ailleurs, en effet, que, puisque le coefficient représentait une perte, il revenait au même de retrancher les 0.4 de 65 lbs, ou les 0.5 de 50 lbs, et qu'ainsi on devait parvenir au même résultat des deux manières. L'une et l'autre méthode étaient donc en usage, et c'est pourquoi nous avons

---

difficile de comprendre comment M. Woolhouse, dans la deuxième édition de l'ouvrage de Tredgold, publiée en 1838, a pu avancer (page 186 de l'Appendice) que Tredgold calculait l'effet utile des machines d'après la *vaporisation* dans la chaudière. La preuve qu'il en donne consiste en ce que, dans le produit formé par l'ancienne théorie pour représenter l'effet utile, savoir, de l'aire du cylindre par la pression de la chaudière, pour avoir l'effort exercé, et de celui-ci par la vitesse du piston, pour avoir l'effet utile, il arrive, en décomposant le résultat, que le produit de l'aire du cylindre, par la vitesse du piston, représente la contenance du cylindre multipliée par le nombre des coups de piston, et équivaut par conséquent à la dépense de vapeur par le cylindre. Il n'en faut pas davantage à M. Woolhouse pour établir son assertion. Mais il faut convenir que si Tredgold employait la vaporisation dans ses calculs, c'était bien alors sans le vouloir et sans le savoir; car, loin de mentionner qu'on doive *observer* la vaporisation dans la chaudière, et s'en servir comme donnée de calcul, il n'indique jamais, au contraire, que l'emploi de la pression et du coefficient constant. Il est évident que Tredgold n'avait pas soupçonné l'ingénieuse décomposition de sa formule, imaginée par M. Woolhouse, et que ce n'est qu'après coup et sur la vue d'autres travaux, que celui-ci en a conçu la pensée.

dû les mentionner toutes deux ; mais, pour éviter la confusion, il convient d'observer que la seconde était censée donner le rapport des *pressions absolues* de la vapeur dans la chaudière et dans le cylindre, et la première, le rapport des *pressions effectives*, ou des *effets utiles* théorique et pratique de la machine.

Telle était la solution du premier des trois problèmes que nous venons d'énoncer. Le second, celui qui consiste à déterminer la vitesse d'une machine avec une charge donnée, n'avait été l'objet d'aucune recherche par le mode de raisonnement que nous venons d'exposer.

Le troisième problème, savoir la détermination de la vaporisation d'eau nécessaire à la production d'un effet donné, avait été résolu d'une manière semblable au premier. La règle consistait à calculer le volume décrit par le piston, et à supposer que ce volume serait rempli de vapeur à la même pression que dans la chaudière, puis à appliquer encore un coefficient constant. En général, on employait le coefficient qui avait été déterminé dans le problème précédent, mais on l'appliquait en diviseur, dans le but d'augmenter la vaporisation en proportion des pertes qui étaient représentées par ce coefficient.

Ainsi, les notations précédentes étant conservées, et q exprimant en outre le volume spécifique de la vapeur formée sous la pression de la chaudière, ou son volume rapporté au volume de l'eau qui l'a produite, on voit que le volume décrit par le piston, pendant l'unité de temps, était av. D'après la signification de la lettre q, ce volume de vapeur représentait un volume d'eau exprimé par

$$\frac{av}{q};$$

mais comme il était censé se faire une perte représentée par la fraction ou coefficient k, le volume d'eau réellement nécessaire pour suffire à la dépense $\frac{av}{q}$, devait être

$$S = \frac{1}{k} \cdot \frac{av}{q}.$$

Tel était donc le calcul en usage ; on voit qu'il était censé résoudre deux seulement des trois problèmes fondamentaux des machines. Nous reviendrons plus loin sur ce qui concerne la détermination de la vitesse du piston sous une charge donnée.

Outre ce qui vient d'être dit, les idées reçues relativement à la pression de la vapeur dans le cylindre, consistaient à penser que la pression dans la chaudière étant donnée et fixe, on pouvait à son gré faire varier la pression dans le cylindre, et y produire toutes les pressions qu'on voudrait, inférieures, toutefois, à celle de la chaudière, en rétrécissant plus ou moins l'orifice des passages de la vapeur ; et l'on croyait que, quand cet orifice était entièrement ouvert, avec l'aire qu'on est

dans l'usage de lui donner dans les machines fixes, savoir : $\frac{1}{25}$ de l'aire du cylindre, la pression de la vapeur dans le cylindre ne pouvait différer que d'une quantité fort petite de la pression dans la chaudière.

Cependant, comme l'*indicateur* de Watt, appliqué au cylindre de plusieurs machines, y avait démontré une certaine diminution de pression comparativement à celle de la chaudière, les auteurs qui tenaient compte de ce fait, sans en voir la véritable cause, le regardaient encore comme susceptible d'être exprimé par un rapport constant, et c'était l'un des élémens qui entraient dans l'explication de leur coefficient définitif. Ainsi, dans tous les cas, la pression du cylindre était considérée comme égale ou proportionnelle à celle de la chaudière, et, par conséquent, comme constante, tant que la pression de la chaudière ne changeait pas, mais nullement réglée par la résistance, et variable avec elle, quelle que soit la pression de la chaudière, comme nous montrerons qu'elle l'est réellement.

Les objections qui se présentent d'abord contre cette manière de calculer et de raisonner sont les suivantes :

1°. Le coefficient adopté comme représentant le rapport des effets utiles théoriques aux effets utiles pratiques, dans les machines stationnaires à haute pression, sans condensation, était 0.50 ; et on l'expliquait en disant que le reste, ou 0.50 de la force totale développée, représentait nécessairement les frottemens et les pertes. Ce n'était pas qu'on eût mesuré ces frottemens et ces pertes, et qu'on les eût trouvés tels ; c'était seulement qu'il s'en manquait de cela que le calcul que l'on avait fait, et qui pouvait être inexact dans son principe même, ne coïncidât avec l'expérience.

Mais pour se convaincre qu'une telle assertion, sur la valeur des frottemens ou pertes, ne reposait sur aucune base solide, il suffit d'examiner l'explication qu'essaie d'en donner l'auteur anglais Tredgold, qui suit aussi cette méthode. Il indique qu'on doit faire une déduction de 4 dixièmes sur la pression *absolue* de la vapeur (pression atmosphérique comprise), ce qui revient, comme nous l'avons vu plus haut, à une réduction exprimée par 0.5 sur la pression *effective* ordinaire de ces machines ; et voici comment il explique cette perte dans l'effet produit (1) :

Force nécessaire à l'introduction de la vapeur dans le cylindre	0.007
Force nécessaire pour chasser la vapeur dans l'atmosphère	0.007
Perte, par le refroidissement, dans le cylindre et dans les tuyaux . . .	0.016
Frottement du piston, pertes et fuites	0.200
Force nécessaire pour l'ouverture des soupapes et le frottement des parties de la machine	0.062
Perte par suite de ce que la vapeur est interceptée avant la fin de la course .	0.100
	0.392

(1) Tredgold, *Traité des Machines à vapeur*, article 367, page 304 de la traduction française.

Quand on fera attention que les nombres donnés ici expriment des fractions de la force *brute totale* de la machine, on se convaincra facilement de l'impossibilité d'admettre de semblables évaluations ; car si, par exemple, la machine avait un effet *utile* de 120 chevaux, ce qui, d'après le coefficient, lui suppose un effet brut de 200, il faudrait $0.20 \times 200 = 40$ chevaux pour tirer le piston (c'est le tiers de l'effet produit); 52 chevaux pour surmonter le frottement total, etc. L'exagération est évidente d'elle-même.

D'ailleurs, en appliquant cette évaluation des frottemens à une machine locomotive, qui est aussi une machine à haute pression, et supposant qu'elle travaille à 60 livres de pression effective, ou 75 livres de pression *absolue* par pouce carré, on voit que si les cylindres avaient douze pouces de diamètre, ou 226 pouces carrés de surface, la force comptée ici comme représentant le frottement du piston serait de $226 \times 75 \times 0.20 = 3390$ livres. Or, nos propres expériences sur le frottement des organes mécaniques de la machine locomotive *Atlas*, qui a ces dimensions et qui travaille à cette pression, démontrent que la force nécessaire pour mouvoir, non seulement les deux pistons, mais encore tous les autres organes mécaniques quand la machine n'est pas chargée, et y compris les fuites, s'il est vrai qu'il y en ait dans une machine en bon état, n'est que de 59 livres appliquées à la roue, ou de $59 \times 5.9 = 348$ livres appliquées sur e p iston (*Traité des Machines locomotives*, 2e. édit., chap. VIII, p. 249).

Il est, par conséquent, impossible d'admettre des évaluations aussi exagérées.

2°. La mesure de l'effet théorique de la machine résulte de trois élémens, savoir : la surface du piston, la pression de la vapeur et la vitesse du mouvement. Les sept causes par lesquelles on explique la réduction qu'éprouve cet effet théorique sont : le frottement de la machine d'abord, et ensuite la liberté du cylindre, le rétrécissement des passages, les coudes des conduits, le frottement de la vapeur, les fuites de vapeur et sa condensation partielle.

Or, parmi ces six dernières causes, il est clair que la liberté du cylindre et les fuites de vapeur ne peuvent, en aucune manière, changer la pression de la vapeur pendant son action : elles en peuvent bien diminuer la quantité utile, et par là réduire la vitesse du piston, mais elles n'en peuvent, à coup sûr, altérer la *pression*. Quant au rétrécissement des passages, aux coudes des conduits et au frottement de la vapeur dans les tuyaux, on conçoit bien à la rigueur que, comme ils opposent un certain obstacle ou exigent une certaine force, ils puissent diminuer quelque peu la portion effective de la pression de la vapeur ; mais il est évident que leur effet principal doit toujours être de réduire la vitesse et non la pression de la vapeur. Des six causes énumérées, il n'y a donc que la condensation qui puisse diminuer efficacement la *pression* de la vapeur pendant son passage, et cette condensation est à-peu-près entièrement obviée par les précautions adoptées dans la pratique. Les autres causes n'ont pas d'effet sensible sur la pression. Donc, si ces causes

produisent définitivement une réduction dans l'effet théorique, ce ne peut être qu'en raison de leur action sur la vitesse.

Mais quand on veut calculer l'effet théorique dans cette méthode, on multiplie d'abord l'aire du piston par la pression de la vapeur dans la chaudière, ce qui donne l'effort théorique ; puis ensuite on multiplie ce résultat, non par la vitesse *théorique* de la machine, que l'on ne connait pas et que l'on ne cherche pas à calculer, mais par sa vitesse *observée* ou pratique. Donc toute réduction applicable à la vitesse théorique se trouve, par cela même, faite déjà dans le calcul, et ne peut y être introduite de nouveau.

Par conséquent, si, malgré l'usage qu'on a fait de la vitesse pratique dans le calcul, on est encore obligé de retrancher les $\frac{2}{3}$ ou les $\frac{3}{4}$ du résultat obtenu, comme nous allons en voir des exemples, il faut que cette perte de $\frac{3}{4}$ de l'effet total soit entièrement due au frottement, ce qui est évidemment impossible.

3°. Nous venons de voir que, pour passer de l'effet théorique à l'effet pratique dans les machines à haute pression, sans condensation, on emploie en général le coefficient 0.50 ; mais il y a plus, cette réduction de moitié, toute considérable qu'elle est, n'est pas encore assez, dans un grand nombre de cas, pour mettre en harmonie les effets pratiques avec les effets appelés théoriques.

En parcourant nos expériences sur les locomotives, on verra que, pour passer de l'effet utile théorique à l'effet utile pratique, la machine *Star* exigerait quelquefois le coefficient 0.38, la machine *Vesta* le coefficient 0.45, la machine *Leeds* le coefficient 0.43, la machine *Fury* le coefficient 0.27, etc. (*), et que ces circonstances se présentent plus ou moins toutes les fois que les machines tirent des charges légères. Ce sont des calculs dont nous donnerons des exemples un peu plus loin.

Ainsi, voilà des cas où il faudrait expliquer dans ces machines une perte de près des trois quarts de leur force totale.

Et cependant, dans les locomotives, les conduits de la vapeur ont une aire de $\frac{1}{12}$, au lieu de $\frac{1}{25}$ de l'aire du cylindre ; ils sont plongés dans la vapeur même de la chaudière, ce qui rend toute fuite impossible, et les cylindres sont en contact avec la flamme du foyer, ce qui ne permet aucune condensation. Ainsi, il ne reste que le frottement et la liberté du cylindre pour expliquer l'énorme perte de 0.73 qu'elles subiraient. Or, ce frottement, mesuré par nous-mêmes, ne s'élève jamais, même avec les charges les plus considérables, au-delà de 0.15 ou 0.18 de ce qu'on nomme l'effet théorique, ainsi qu'on pourra le reconnaître plus loin, et la liberté du cylindre n'absorbe que 0.05 de la dépense totale de vapeur, ou de l'effet brut produit.

4°. Nous venons de voir que, pour les locomotives, le coefficient devrait, dans

---

(*) *Star* descendant une pente à $\frac{1}{349}$ avec une charge de 59.84 tonnes; *Vesta* descendant une pente à $\frac{1}{4237}$ avec 33.15 tonnes; *Leeds* montant une pente à $\frac{1}{1094}$ avec 53.15 tonnes; *Fury* descendant une pente à $\frac{1}{1300}$ avec 48.80 tonnes (p. 439 à 444 du *Traité des Locomotives*, 2e. édition).

certains cas, se réduire à 0.27. Mais dans d'autres cas, au contraire, on trouve que, pour la même machine, il devrait s'élever au-de-là de 0.80, comme on peut en trouver des exemples dans notre *Traité des Locomotives*, pour tous les cas où la machine tirait des charges considérables.

Par exemple, on trouvera que, pour passer de l'effet utile théorique à l'effet utile pratique, la machine *Star* exigerait quelquefois le coefficient 0.79, la machine *Vesta* le coefficient 0.79, la machine *Leeds* le coefficient 0.88, la machine *Fury* le coefficient 0.89 (*). Ainsi, toute la perte, si péniblement expliquée précédemment, se trouve avoir disparu tout-à-coup, et l'on remarquera cependant que cette circonstance ne se présente que quand la charge des machines est très-considérable, c'est-à-dire quand leur frottement devient d'autant plus considérable aussi.

Il est donc clair que ces différences inexplicables entre la théorie et les faits ne peuvent provenir que d'une erreur dans cette théorie elle-même, que les résultats qu'elle produit ne peuvent être considérés tout au plus que comme des approximations, et non comme susceptibles de faire connaître, d'une manière exacte et analytique, soit les effets, soit les proportions des machines.

§ II. *Formules proposées en outre, par divers auteurs, pour déterminer la vitesse du piston sous une charge donnée, et preuves de leur insuffisance.*

Nous avons dit que, dans la théorie précédente, la vitesse du piston sous une charge donnée n'avait pas été l'objet d'une recherche spéciale. Quelques essais avaient été entrepris à cet égard, mais par une route différente. On avait cherché à déduire la vitesse du piston de celle d'un gaz à la pression de la chaudière, qui s'écoulerait dans un gaz à la pression indiquée par la résistance de la charge contre le piston. Les formules que nous allons citer plus loin, quoique présentées sans discussion par leurs auteurs, ont évidemment été obtenues par ce moyen, comme l'indique assez leur forme comparée à celle des formules propres à l'écoulement des gaz.

Un tel mode de calcul ne peut conduire à aucun résultat exact, car il donne uniquement la *plus grande* vitesse que soit susceptible de prendre le gaz à la plus grande pression en s'écoulant dans l'autre gaz ; or, dans la réalité, il est clair que la vitesse sera bientôt limitée par la quantité de vapeur que peut fournir la chaudière par minute. Si cette production de vapeur suffit, par exemple, à remplir 200 fois le cylindre par minute, il y aura 200 coups de piston ; si elle suffit à le remplir 300 fois, il y aura 300 coups de piston ; et, enfin, si l'on suppose que la production de vapeur soit assez considérable pour suffire à la vitesse ci-dessus,

---

(*) *Star* montant une pente à $\frac{1}{1800}$ avec une charge de 120.27 tonnes ; *Vesta* montant une pente à $\frac{1}{89}$ avec 33.15 tonnes ; *Leeds* montant une pente à $\frac{1}{89}$ avec 35.15 tonnes ; *Fury* montant une pente à $\frac{1}{96}$ avec 56.16 tonnes. (p. 439 à 444 du *Traité des Locomotives*, 2e. éd.).

qui est la plus grande possible pour des gaz ayant ces pressions respectives, alors cette vitesse s'établira, et non avant.

Les formules obtenues par ce moyen donneraient donc le *maximnm* de vitesse possible et non la vitesse réelle. S'il en était autrement, il serait indifférent qu'une machine eût une grande ou une petite chaudière, qu'elle produisit une énorme ou une très-petite quantité de vapeur par minute, la vitesse serait toujours la même. Aussi, les calculs de ce genre ne se trouvent-ils d'accord avec aucun fait pratique.

D'ailleurs, à l'égard des formules qu'on pourrait tenter de déduire de considérations semblables à celles qui précèdent, il nous paraît difficile qu'on puisse en obtenir des résultats certains; car la théorie du mouvement des fluides suppose ce qu'on appelle le parallélisme des tranches; pour la simplifier, on l'applique ordinairement en considérant l'orifice du passage comme infiniment petit; le coefficient de correction qu'on y emploie est celui qne l'expérience a indiqué pour les liquides, ou pour des différences de pression peu considérables dans les gaz; on ne peut y tenir compte, d'une manière précise, ni des réductions de diamètre, ni des coudes à angle droit, mais arrondis, qui ont lieu dans le tuyau de conduite de la vapeur; on n'y peut non plus faire entrer avec certitude le frottement de la vapeur à une grande vitesse, dans un tuyau étroit et d'une grande longueur. Enfin, on calcule le plus souvent dans la supposition d'un fluide semblable à l'eau, qui conserverait la même densité jusqu'à la sortie du tuyau, tandis que dans le tuyau de conduite de la vapeur, la pression varie considérablement dans toute son étendue, étant en équilibre, à chacun de ses bouts, avec la chaudière d'une part et avec le cylindre de l'autre. Ce calcul engage donc dans des difficultés en quelque sorte inextricables, sans compter qu'il suppose toujours la production de vapeur inépuisable dans la chaudière, motif qui suffit à lui seul pour en démontrer l'inefficacité.

Du reste, les recherches relatives à la question qui nous occupe se réduisent aux suivantes :

1°. Tredgold, dans son *Traité des chemins de fer* (p. 83 de l'édition anglaise), propose une formule, sans la fonder en aucune façon sur les raisonnemens ou sur les faits. Cette formule est :

$$V = 240\sqrt{l\frac{P}{W}}.$$

V est la vitesse du piston en pieds par minute, l la course du piston, P la pression effective de la vapeur dans la chaudière, et W la résistance de la charge. Cette formule est destinée à faire connaître la vitesse du piston. Mais comme il n'y est fait aucune mention de la quantité de vapeur que fournit la chaudière par minute, il est clair qu'elle ne saurait donner la vitesse cherchée; car, si elle pouvait être exacte, la surface de chauffe, ou la vaporisation de la chaudière, serait

totalement indifférente. Une machine n'irait pas plus vite avec une chaudière qui vaporiserait 1 pied cube d'eau par une minute, qu'avec une chaudière qui n'en vaporiserait que le $\frac{1}{4}$ ou le $\frac{1}{10}$. Ainsi, cette formule est sans fondement.

2°. Wood, dans son *Traité des chemins de fer* (p. 351 de la seconde édition anglaise), propose aussi, et de même sans discussion, la formule suivante :

$$V = 4\sqrt{l\frac{P}{W}}.$$

V est la vitesse du piston en pieds par minute, l la course du piston, W la résistance de la charge et P le surplus de la pression dans la chaudière, au-delà de ce qu'il faut pour balancer la résistance W. Cette formule, ne contenant pas de terme pour représenter la force de vaporisation de la chaudière, se trouve, comme la précédente, démontrée inexacte *à priori*; et nous ne citons pas ces faits pour diminuer le mérite de ces auteurs, mais seulement pour établir l'état de la science dans l'ancienne théorie (*).

Nous ne connaissons pas d'autre essai fait pour arriver à la solution de ce problème, et l'on voit que ceux-ci ne sont nullement satisfesans.

Par conséquent, sur les trois problèmes fondamentaux que nous avons énoncés, deux ont reçu une solution inexacte au moyen des coefficiens, et le troisième n'en a reçu aucune.

§ III. *Aperçu de la théorie proposée.*

Nous avons jusqu'ici démontré qu'il n'existe aucune formule analytique, ou aucun moyen exact de calculer les effets des machines à vapeur, et, par conséquent, de déterminer les proportions qu'il convient de leur donner pour en obtenir des effets voulus. On construit un grand nombre de machines, qui sont censées devoir satisfaire à des conditions exigées ; mais la vérité est qu'à moins qu'elles n'aient été calquées sur d'autres déjà établies, on n'en connait les effets précis qu'en les soumettant à l'expérience après leur construction, c'est-à-dire quand il n'est plus temps d'appliquer le remède. Dans une machine qui est la plus puissante de toutes celles connues, et qui tend à devenir presque universelle, les erreurs ne peuvent être sans importance. Non seulement ces erreurs ont porté souvent préjudice à de grandes entreprises industrielles, et ont été l'occasion de débats entre les constructeurs et les acquéreurs des machines ; mais elles ont même compromis la vie d'un grand nombre de personnes, parce qu'il s'est trouvé que des bateaux à vapeur,

---

(*) Depuis, dans la troisième édition du même ouvrage (Londres, 1838, p. 553 à 577), M. Wood a adopté entièrement la théorie développée dans notre *Traité des Locomotives*, sans indiquer, dans le corps du livre, la source d'où il a tiré cette théorie, mais en réparant ensuite cet oubli dans une note ajoutée exprès en tête de l'ouvrage.

ayant été reconnus dans l'impuissance d'accomplir la tâche à laquelle ils étaient destinés, les ingénieurs ou les machinistes qui les dirigeaient n'ont trouvé de remède au mal que de surcharger ou même de fixer tout-à-fait les soupapes de sûreté, et souvent de terribles explosions en ont été le résultat. La nécessité et l'utilité de nouvelles recherches à cet égard ne sauraient donc être mises en doute.

Après avoir fait connaître l'état de la science, en ce qui concerne la théorie de la machine à vapeur, il nous reste à montrer sur quels principes nous établissons celle que nous avons à présenter.

Nous expliquerons d'abord cette théorie dans toute sa simplicité, en supposant que la vapeur conserve la même température pendant son action dans la machine, et en nous bornant aux machines à vapeur rotatives sans détente, qui sont les plus simples. Pour l'établir, nous nous fonderons uniquement sur la considération du mouvement uniforme auquel ces machines parviennent nécessairement au bout d'un très-court intervalle de temps. Ensuite, nous présenterons un grand nombre de preuves théoriques et pratiques, qui finiront d'établir l'exactitude de nos raisonnemens. Puis enfin, dans un chapitre suivant, nous reprendrons la même théorie dans toute sa généralité, de manière à la rendre applicable à tous les systèmes de machines à vapeur, et en y tenant compte des circonstances négligées d'abord.

On sait que, dans toute machine, l'effort du moteur étant d'abord supérieur à la résistance, il se produit un mouvement très-petit qui s'accélère pendant un certain temps, jusqu'à ce que la machine ait atteint une certaine vitesse, qu'elle ne dépasse plus, le moteur n'étant pas capable d'en soutenir une plus grande avec la masse qu'il a à mouvoir. Une fois la machine arrivée à ce point, ce qui n'exige qu'un temps très-court, la vitesse continue la même, et le mouvement se maintient uniforme pendant tout le reste du travail. Ce n'est qu'à partir de ce moment qu'on commence à calculer les effets des machines, et l'on néglige toujours le peu de minutes pendant lesquelles leur vitesse se règle, c'est-à-dire les effets transitoires qui se produisent depuis la vitesse zéro jusqu'à la vitesse uniforme.

Or, dans toute machine parvenue au mouvement uniforme, la puissance fait strictement équilibre à la résistance; car si elle était plus grande ou plus petite, il y aurait accélération ou retardation de mouvement, ce qui n'a pas lieu. Dans une machine à vapeur, la force appliquée par le moteur n'est autre que la pression de la vapeur *contre le piston* ou *dans le cylindre*. Donc, cette pression dans le cylindre est strictement égale à la résistance que la charge exerce contre le piston.

Par conséquent, la vapeur, en passant de la chaudière dans le cylindre, change de pression et prend celle qui représente la résistance du piston. Ce principe explique à lui seul toute la théorie des machines à vapeur, et met leur jeu comme à découvert.

Il devient facile, en effet, de se rendre compte de ce qui se passe dans une machine à vapeur qu'on met en mouvement. La vapeur, étant d'abord enfermée dans la chaudière à un certain degré de pression, se précipite dans les tuyaux de conduite,

et de là dans le cylindre, aussitôt que le robinet de distribution ou régulateur est ouvert. En arrivant dans le cylindre, dont l'aire est beaucoup plus grande que celle des tuyaux, cette vapeur se dilate d'abord en perdant proportionnellement de sa force élastique ; mais comme le piston est encore immobile, et que la vapeur continue d'arriver rapidement, l'équilibre de pression s'établit promptement entre les deux vases, et le piston, poussé par toute la force de la vapeur, commence à se mouvoir lentement. Le volant de la machine, son mécanisme entier et la résistance qui lui est appliquée, commencent donc à prendre une très-petite vitesse, qui s'accélère par degrés insensibles ; et si, à la fin de la course du piston, on supprimait tout-à-coup l'arrivée de la vapeur, le piston ne s'arrêterait pas pour cela instantanément. Il serait entraîné quelque temps lui-même par l'effet de la vitesse qu'il a précédemment communiquée à la masse. D'après cet effet, il arrive qu'à la course suivante, la vapeur trouve le piston déjà lentement entraîné dans le sens rétrograde, au moment où elle lui imprime une nouvelle quantité de mouvement ; et celle-ci passe encore au volant et à la masse totale, où elle continue de s'accumuler. Ainsi, recevant à chaque course une nouvelle impulsion, le piston accélère peu à peu son mouvement, et finit par acquérir toute la vitesse que le moteur est capable de lui communiquer.

Pendant tout ce temps, la vapeur continue de se produire dans la chaudière avec la même vitesse, et d'arriver dans le cylindre; mais à mesure que le piston acquiert un mouvement plus rapide et développe un plus grand volume devant la vapeur, cette dernière s'y dilate en prenant une pression plus petite. Donc, enfin, lorsque le piston a pris une vitesse capable de consommer, à sa pression réduite, toute la vapeur qui se forme dans la chaudière, la pression de la vapeur dans le cylindre devient égale à la résistance du piston, et le mouvement reste à l'état d'uniformité, comme on l'a dit plus haut.

Ainsi, nous avons, d'après ce qui précède, la pression que la vapeur exerce réellement contre le piston ; de sorte que si P' exprime cette pression par unité de surface, et que R représente la résistance de la charge contre le piston, supposée de même répartie par unité de surface et frottemens compris, la condition de l'uniformité du mouvement fournira d'abord la première équation de relation

$$P' = R.$$

Cette équation établit l'intensité de l'effort exercé par la puissance. S'il n'était question que d'un cas d'équilibre, cette détermination suffirait ; mais, dans un cas de mouvement, il faut, outre l'intensité de la force, considérer encore la vitesse avec laquelle cette intensité est appliquée. Or, dans le cas dont il s'agit, il est évident que c'est la vitesse de production de la vapeur dans la chaudière qui indique la vitesse avec laquelle la force ci-dessus est renouvelée ou appliquée. C'est donc à ce dernier élément de calcul que nous devons avoir recours pour obtenir, entre les données du problème, une seconde relation comprenant la vitesse du mouvement.

Cette relation nous sera fournie par la considération qu'il y a nécessairement égalité entre la quantité de vapeur produite et la quantité de vapeur dépensée, proposition qui est évidente d'elle-même. Si donc, nous continuons d'exprimer par S le volume d'eau vaporisé par unité de temps dans la chaudière et effectivement transmis au cylyndre, et par q le rapport du volume de la vapeur formée sous la pression P de la chaudière au volume de l'eau qui l'a produite, il est clair que

$$qS$$

sera le volume de vapeur formé par unité de temps et sous la pression P dans la chaudière. Cette vapeur passe dans le cylindre et elle y prend la pression P'; mais si l'on suppose que, dans ce mouvement, la vapeur conserve sa température, ce qui, pour les machines que nous considérons, ne change que fort peu les résultats, la vapeur, en passant de la pression P à la pression P', augmentera de volume en raison inverse des pressions. Ainsi, transmis au cylindre, le volume q S de vapeur, fourni à chaque unité de temps par la chaudière, deviendra

$$qS\frac{P}{P'}.$$

D'un autre côté, v étant la vitesse du piston et a l'aire du cylindre, av sera le volume de vapeur dépensé par le cylindre dans une unité de temps. Donc, en raison de l'égalité qui existe nécessairement entre la production et la dépense de vapeur, on aura la relation

$$av = qS\frac{P}{P'},$$

qui est la seconde relation cherchée. Par conséquent, en éliminant P' entre ces deux équations, on aura pour la relation analytique définitive entre les diverses données du problème,

$$v = \frac{qS}{a}\cdot\frac{P}{R}.$$

Cette équation très-simple donne donc la vitesse que prendra le piston d'une machine sous une résistance donnée R. Si l'on suppose, au contraire, que la vitesse du mouvement soit connue, et que l'on veuille calculer la résistance que la machine pourra mouvoir à cette vitesse, il suffira de résoudre la même équation par rapport à R, et l'on aura

$$R = \frac{qSP}{av}.$$

Enfin, si l'on suppose que la vitesse et la charge soient données à l'avance, et que l'on veuille connaître la vaporisation que doit avoir la chaudière pour que la charge

donnée soit mise en mouvement à la vitesse fixée, il suffira encore de tirer de cette relation la valeur de S, qui sera

$$S = \frac{avR}{qP}.$$

Nous bornerons ici nos déductions, parce que, comme nous l'avons dit, ces trois problèmes sont la base de tous ceux qu'on peut se proposer dans les machines, et qu'ils suffisent d'ailleurs pour pouvoir établir notre théorie et la comparer avec le mode de calcul en usage. Mais, en reprenant ces mêmes questions avec plus de détails dans la suite de cet ouvrage, nous donnerons aux équations leur entier développement, et nous traiterons alors de toutes les autres déterminations accessoires qui se présentent dans les problèmes relatifs aux machines à vapeur.

On voit, d'après ce qui précède, que nous fondons toute notre théorie sur ces deux faits, qui sont incontestables : 1°. que la machine étant arrivée au mouvement uniforme, il y a nécessairement équilibre entre la puissance et la résistance, c'est-à-dire entre la pression de la vapeur *dans le cylindre*, et la résistance contre le piston, ce qui fournit d'abord la première relation

$$P' = R;$$

et 2°. qu'il y a nécessairement aussi égalité entre la dépense et la production de vapeur, ce qui fournit la seconde relation

$$v = \frac{qS}{a} \cdot \frac{P}{P'}.$$

Et ces deux équations suffisent ensuite à la solution de tous les problèmes.

§ IV. *Nouvelles preuves de l'exactitude de cette théorie et de l'inexactitude de la théorie ordinaire.*

Comme nous tirerons de l'examen des machines locomotives la plupart des considérations que nous allons présenter d'abord sur les deux théories, et que nous avons déjà cité, dans le même sens, quelques faits relatifs à leur travail, nous dirons avant tout, à l'égard de ces machines, que nous les regardons comme étant sans contredit plus propres que toutes les autres à faire connaître la vraie théorie du mouvement et de l'action de la vapeur. Les raisons de cette préférence sont : 1°. que ces machines sont d'une simplicité remarquable ; 2°. que la résistance qu'elles ont à mouvoir est d'une évaluation comparativement facile et susceptible d'une grande exactitude, puisqu'il s'agit simplement de peser le train qu'elles ont à conduire; tandis que, pour évaluer la résistance opposée aux machines stationnaires, il faut souvent des calculs très-variés et en même temps très-peu certains ; 3°. que le frottement des locomotives est connu d'après nos propres expériences, et avec un degré d'exactitude qui paraît susceptible de confiance, puisque ce frottement a été déterminé par

plusieurs méthodes, qui sont devenues la vérification l'une de l'autre ; 4°. qu'il est facile d'observer une machine locomotive dans cent circonstances différentes les unes des autres, en fesant à son gré varier la charge et la vitesse, ce qui peut se faire dans des limites très-écartées ; tandis que, dans les machines stationnaires, il arrive le plus souvent que la résistance à mouvoir n'est pas susceptible de variation, d'où résulte qu'on n'y voit jamais agir la vapeur que d'une même manière, et qu'ainsi l'étude de ces machines se réduit à-peu-près à l'étude d'un cas particulier. D'un autre côté, il est évident qu'une théorie, pour être exacte, doit être générale, et par conséquent comprendre les locomotives aussi bien que toutes les autres machines. Si donc un mode de calcul ne s'appliquait pas aux locomotives, il serait, par ce fait seul, démontré inexact.

Pour revenir à la théorie que nous avons exposée, on voit qu'elle repose principalement sur ce que la vapeur peut bien se former dans la chaudière à une certaine pression P, mais qu'en passant dans le cylindre elle prend une pression R, strictement déterminée par la résistance sur le piston, quelle que soit d'ailleurs la pression dans la chaudière ; de sorte que, selon l'intensité de cette résistance, la pression dans le cylindre, loin d'être égale à celle de la chaudière, ou d'en différer dans un rapport constant, comme on le croit, pourra quelquefois lui être tout-à-fait égale et quelquefois en différer considérablement. Ainsi, lorsque, dans la théorie ordinaire, on fait d'abord le calcul en supposant que la vapeur agit dans le cylindre à la pression de la chaudière, on commence par introduire dans ce calcul une erreur souvent très-considérable et indépendante de toutes les pertes réelles que peut éprouver la machine, puisque l'on considère comme appliquée une force souvent deux ou trois fois aussi grande que celle qui est appliquée réellement. Il n'est donc pas étonnant qu'on soit ensuite dans la nécessité d'employer un coefficient $\frac{1}{3}$ ou $\frac{1}{4}$, qui fait paraître énormes les pertes censées éprouvées par la machine, tandis que l'erreur réelle est dans le point de départ même du calcul.

Nous avons déjà prouvé ce mode d'action de la vapeur dans le cylindre, par la considération du mouvement uniforme ; mais en examinant ce qui se passe dans la machine, nous en trouvons à l'instant bien d'autres preuves :

1°. En effet, la vapeur, étant produite à un certain degré de pression dans la chaudière, passe dans le tuyau de communication, et de là dans le cylindre; elle s'y dilate d'abord, parce que l'aire de ce cylindre est de 10 à 25 fois celle du tuyau, et elle s'y élèverait promptement au même degré de pression que dans la chaudière, si le piston était immobile. Mais comme ce piston n'oppose au contraire qu'une certaine résistance, déterminée par la charge que meut la machine, 40 livres par pouce carré, par exemple, il obéira dès que la force élastique de la vapeur dans le cylindre aura atteint ce point. Un piston qui ne supporte qu'une résistance de 40 livres par pouce carré n'est autre chose qu'une soupape chargée de 40 livres par pouce carré. Si la communication entre la chaudière et le cylindre était

3

complètement libre et sans tuyau ou rétrécissement, de sorte que les deux vases n'en formassent qu'un seul, le piston deviendrait une vraie soupape pour la chaudière; et cette soupape cédant avant la soupape de sûreté, qui est chargée, par exemple, de 50 livres par pouce carré, la vapeur ne pourrait s'élever dans la chaudière au-delà de 40 lbs. par pouce carré. Comme la communication entre les deux vases n'est pas entièrement libre, le piston n'est pas une soupape pour la chaudière, mais il continue d'en être une pour le cylindre. Donc la pression dans ce cylindre ne pourra jamais excéder la résistance du piston.

2°. Une autre considération nous prouvera facilement encore que la pression de la vapeur dans le cylindre doit nécessairement être réglée, non par la pression dans la chaudière, mais par la pression de la résistance. En effet, s'il était vrai que la vapeur se dépensât dans le cylindre, soit à la pression de la chaudière, soit à toute autre pression qui fût à celle de la chaudière dans un rapport fixe quelconque, comme la quantité de vapeur élevée par minute dans la chaudière se dépenserait alors par le cylindre à une pression identique dans tous les cas et remplirait, par conséquent, le cylindre un nombre fixe de fois par minute, il s'ensuivrait que tant que la machine travaillerait avec la même pression dans la chaudière, et les mêmes ouvertures ou passages de la vapeur, elle prendrait la même vitesse avec toutes les charges. Or, nous voyons précisément tout le contraire se produire, c'est-à-dire que plus la charge est petite, plus la vitesse de la machine devient grande.

L'effet qui se produit alors s'explique bien facilement, quand on veut se rendre compte de ce qui se passe réellement dans la machine. Si l'on suppose que la vaporisation, en fournissant, par exemple, 200 pieds cubes de vapeur par minute, à la pression de la chaudière, suffise à remplir 200 fois le cylindre, lorsque le piston est chargé de la résistance R; une fois que cette résistance R sera remplacée par une résistance $\frac{1}{2}$R, la même masse de vapeur prenant dans le cylindre une pression moitié de ce qu'elle était avant, fournira par minute 400 cylindres pleins de vapeur, à la nouvelle pression. Donc, il est clair que la résistance $\frac{1}{2}$R sera mise en mouvement à une vitesse double de la résistance R : ce qu'on observe effectivement, quand, dans l'évaluation de cette résistance, on fait entrer toutes les résistances partielles et frottemens réellement opposés au mouvement de la machine.

3°. En appliquant le même raisonnement à l'inverse, on voit que, s'il était vrai que la pression du cylindre fût dans un rapport fixe à celle de la chaudière, ou si l'on veut, fût constante tant que celle de la chaudière ne varie pas, en calculant l'effort que peut exercer la machine, on le trouverait toujours le même, quelle que fût la vitesse du piston. Ainsi, à toute vitesse quelconque, la machine serait toujours capable de mouvoir la même charge. Or, ce résultat est encore démenti par l'expérience; parce que, plus la vitesse du piston est grande, plus la pression de la vapeur baisse dans le cylindre; d'où résulte que la charge que peut mouvoir la machine diminue en même proportion.

4°. Il est aisé d'en produire encore une autre preuve non moins évidente : s'il était vrai que la vapeur se dépensât, par le cylindre, à une pression égale à celle de la chaudière, ou qui fût à celle-ci dans un rapport fixe indiqué par un coefficient quelconque, puisqu'il faut toujours à une même locomotive le même nombre de tours de roue, ou le même nombre de coups de piston, pour parcourir la même distance, il s'ensuivrait que tant que ces machines travaillent à la même pression, elles devraient consommer dans tous les cas la même quantité d'eau pour la même distance. Or, la quantité d'eau dépensée, loin de rester constante, décroît, au contraire, avec la charge, comme on peut le voir dans les expériences que nous avons publiées sur ce sujet. Par exemple, la machine *Atlas* a dépensé 132 pieds cubes d'eau en tirant 195.5 tonnes, et 95 pieds cubes seulement en tirant 127.6 tonnes (*Traité des Locomotives*, 2°. édit., p. 284 et 442). Puisqu'il y a eu même nombre de cylindres de vapeur dépensés dans les deux cas, il faut bien que la vapeur qui remplissait les premiers ait une densité différente de celle qui remplissait les seconds; et l'on voit encore ici que, malgré l'égalité de pression dans la chaudière et d'ouverture de régulateur dans les deux cas, la densité de la vapeur dépensée a suivi l'intensité de la résistance, c'est-à-dire que la pression de la vapeur dans le cylindre a été réglée par cette résistance.

5°. Par le même motif qu'on vient d'expliquer, la consommation de combustible devant être proportionnelle à la vaporisation effectuée, il s'ensuivrait encore, si la théorie ordinaire était exacte, que la quantité de combustible consommée par une locomotive donnée, pour la même distance, serait toujours la même, quelle que fût sa charge. Or, nous trouvons encore, par l'expérience, que cette quantité de combustible diminue, au contraire, avec la charge, conformément à l'explication que nous donnons des effets de la vapeur dans les machines (*Traité des Locomotives*, 2°. édit., p. 350).

6°. Il est clair encore que si la pression dans le cylindre était, comme on le croit, constante pour une pression donnée dans la chaudière, dès qu'on aurait reconnu qu'une machine peut tirer une certaine charge avec une certaine pression, et lui communiquer un mouvement uniforme, il s'ensuivrait que jamais cette machine ne pourrait tirer une charge moindre avec la même pression dans la chaudière, sans lui communiquer un mouvement indéfiniment accéléré; puisque la puissance, s'étant trouvée égale à la résistance du premier cas, se trouverait nécessairement supérieure à la résistance du second. Or, l'expérience prouve que dans ce second cas, le mouvement n'en est pas moins uniforme, comme dans le premier; et la raison en est que la vapeur peut bien se former, dans la chaudière, à une pression plus ou moins élevée, ce qui importe peu, mais qu'en passant dans le cylindre, elle prend toujours la pression de la résistance; d'où résulte que dans ce second cas, pas plus que dans le premier, la puissance n'est supérieure à la résistance, et qu'ainsi le mouvement doit rester uniforme.

7°. Enfin, en parcourant nos expériences sur les locomotives, on y verra la même machine tirer quelquefois une charge très-faible avec une très-haute pression dans la chaudière ; et ensuite une charge très-forte, au contraire, avec une pression très-faible. Il est donc impossible d'admettre, comme le veut la théorie ordinaire, qu'il y ait un rapport fixe quelconque entre les deux pressions. Du reste, cet effet est bien facile à expliquer, car il tient simplement à ce que, dans les deux cas, la pression dans la chaudière était supérieure à la résistance sur le piston; et c'était tout ce qu'il fallait pour que la vapeur, produite à cette pression, ou à toute autre satisfesant seulement à la même condition, pût, en passant dans le cylindre, prendre la pression de la résistance.

On remarquera, du reste, que tous ces effets ne peuvent se produire dans une machine à vapeur locomotive, sans se produire également dans une machine à vapeur stationnaire ; car, après tout, la vapeur n'en agit pas moins dans les cylindres exactement de la même manière, et il importe peu que, pendant l'action de cette vapeur, la machine change de place ou reste en repos, et que son propre poids forme, ou ne forme pas, une partie de la charge imposée sur le piston.

Quant à l'opinion émise par quelques personnes, que la diminution excessive des passages de la vapeur dans les locomotives et l'augmentation de la vitesse du piston, y produiraient des réductions d'effets qui n'ont pas lieu dans les machines stationnaires, c'est là certainement une erreur. En effet, dans les locomotives, les passages de la vapeur se font moyennement de $\frac{1}{12}$ de l'aire du cylindre, comme on peut le vérifier à l'égard des machines dont nous avons donné les dimensions dans notre *Traité des Locomotives* (2°. édit., p. 302) ; et chacun sait que, dans les machines à vapeur stationnaires, on ne donne aux passages de la vapeur que $\frac{1}{25}$ de l'aire du cylindre. L'avantage, sous ce rapport, est donc en faveur des locomotives. Quant à la vitesse du piston, dans une locomotive qui parcourt de 15 à 20 milles anglais par heure, ou de 1320 à 1760 pieds par minute, le piston, dont la vitesse n'est que $\frac{1}{6}$ de celle de la roue, ne parcourt que 220 à 293 pieds par minute. En mesures françaises, dans une locomotive qui fait de 24 à 32 kilomètres par heure, la vitesse du piston n'est que de 67 à 89 mètres par minute. Or, on sait que les machines stationnaires marchent à des vitesses variant entre 150 et 300 pieds anglais par minute; les vitesses des locomotives ne sont donc nullement hors des limites admises comme *normales* pour les machines stationnaires. Par conséquent, on n'y trouve, ni à l'égard des passages de la vapeur, ni à l'égard de la vitesse du piston, des différences sur lesquelles on pourrait se croire fondé à admettre une théorie différente pour les deux espèces de machines.

§ V. *Expériences sur des machines stationnaires, qui confirment les observations précédentes.*

Nous venons de voir qu'il n'existe pas, entre les machines à vapeur locomotives et les machines à vapeur stationnaires, des différences qui donnent lieu de penser que la vapeur ne se conduirait pas dans les unes comme dans les autres; cependant, pour qu'il ne puisse rester aucun doute à cet égard, nous allons maintenant présenter les résultats des diverses expériences que nous avons entreprises à ce sujet, et qui prouveront que dans les machines stationnaires, tout aussi bien que dans les locomotives, il est impossible d'admettre, comme le veut l'ancienne théorie, qu'il y ait, soit égalité, soit proportionnalité quelconque, entre la pression de la vapeur dans la chaudière et la pression de la vapeur dans le cylindre.

Une machine à vapeur à haute pression, sans détente, employée à Brighton, en Angleterre, à l'établissement public de la distribution des eaux dans la ville, est la première que nous avons soumise à l'expérience. Cette machine présente les dimensions et données suivantes : diamètre du cylindre, 16 pouces ; course du piston, 3 pieds; pression effective ordinaire de la vapeur dans la chaudière, 40 livres par pouce carré; vitesse normale du piston, 60 courses ou 180 pieds par minute; diamètre du tube à vapeur, 4.25 pouces. La machine peut mettre en jeu, soit 6 pompes d'épuisement, soit 3 pompes seulement; nous nous sommes donc proposé de mettre à profit cette circonstance, pour examiner les conditions de son mouvement avec ces deux charges respectives.

1re. Expérience. La machine manœuvre 6 pompes de 18 pouces de course, dont 3 de 8 pouces de diamètre et 3 de 8.5 pouces de diamètre; elle a travaillé pendant 6 heures 0 minute, en vaporisant 143.285 pieds cubes d'eau, et a donné très-régulièrement, pendant ce temps, 56.11 coups de piston par minute. La pression effective moyenne de la vapeur dans la chaudière, ou plutôt dans le tube à vapeur près de l'entrée du cylindre, prise au manomètre à mercure, était de 39.79 livres par pouce carré (maximum, 41; minimum, 38.5).

2e. Expérience. La machine manœuvre 3 pompes de 8 pouces de diamètre; elle a travaillé pendant 4 heures 50 minutes, en vaporisant 89.052 pieds cubes d'eau, et a donné 57.30 coups de piston par minute. La pression effective moyenne dans la chaudière était 40.42 lbs. par pouce carré (maximum, 41.50; minimum, 40).

3e. Expérience. La machine manœuvre les trois mêmes pompes; on cherche quelle est la moindre pression avec laquelle elle puisse se maintenir en mouvement. La pression effective dans la chaudière étant réduite à 15.5 livres par pouce carré, la machine maintient une vitesse de 42 coups de piston par minute.

4e. Expérience. La machine marche à vide, fesant mouvoir seulement un arbre d'engrenage, mais sans pompes; on cherche la moindre pression avec laquelle elle

peut se maintenir en mouvement. La pression effective dans la chaudière étant réduite à 3.5 livres par pouce carré, la machine maintient une vitesse de 22 coups de piston par minute.

Pendant la première de ces expériences, la machine a travaillé dans son état régulier, c'est-à-dire avec son gouverneur à force centrifuge et sa soupape à gorge réglés comme à l'ordinaire, quand elle manœuvre six pompes. Pendant la deuxième expérience, la machine a également travaillé dans son état normal, quand elle manœuvre trois pompes; il n'y avait donc *absolument* rien de changé aux circonstances habituelles du travail de la machine. Pendant les troisième et quatrième expériences, tout est resté réglé comme dans la deuxième expérience.

Il résulte de la quatrième expérience que le frottement de la machine, avec son arbre d'engrenage et ses roues dentées, mais sans charge proprement dite, ne pouvait excéder 3.50 lbs. par pouce carré de la surface du piston, et la lenteur excessive du mouvement permet d'admettre que l'équilibre de pression avait le temps de s'établir entre la chaudière et le cylindre, de sorte qu'on peut, sans erreur sensible, regarder 3.50 lbs. par pouce carré comme représentant le frottement propre de la machine.

La troisième expérience démontre de même que la charge *totale* de la machine avec 3 pompes, et tout frottement compris, ne se montait au plus qu'à 15.5 livres par pouce carré de la surface du piston, et en en retranchant le frottement de la machine, il s'ensuit que la charge et le frottement des trois pompes de 8 pouces de diamètre s'élevaient à 12.0 livres par pouce carré.

Enfin, puisque la charge des 3 pompes de 8 pouces était représentée par une pression de 12 livres par pouce carré, il s'ensuit que le travail des trois pompes de 8.5 pouces de diamètre devait, en proportion des trois premières, exiger une pression de 13.55 livres par pouce carré du piston; de sorte que le travail des 6 pompes ensemble, plus le frottement, formait une résistance totale de $12 + 13.55 + 3.50 = 29.05$ livres par pouce carré du piston à vapeur.

Donc les expériences présentaient les résultats suivans :

Exp. III.	Pression effective dans la chaudière.	15.50	rapport 1.
	dans le cylindre (à très-peu près). .	15.50	
Exp. II.	Pression effective dans la chaudière.	40.42	rapport 0.38.
	dans le cylindre.	15.50	
Exp. I.	Pression effective dans la chaudière.	39.79	rapport 0.73.
	dans le cylindre.	29.05	

La seconde machine que nous avons soumise à l'expérience est une machine du système d'Evans, c'est-à-dire à haute pression et à détente, qui était employée dans le même établissement et qui servait au même usage que la première, toutefois au moyen d'engrenages différens. Elle présentait les dimensions et données suivantes : diamètre du cylindre, 16.5 pouces; course du piston, 3 pieds; portion de

la course parcourue avant la détente de la vapeur, 0.517 de la course totale; pression effective ordinaire de la vapeur dans la chaudière, 40 livres par pouce carré; vitesse normale du piston, 180 pieds par minute; diamètre du tube à vapeur, 4.50 pouces. Avec cette machine, les expériences ont donné les résultats qui suivent :

1re. Expérience. La machine manœuvre 6 pompes de 18 pouces de course, dont 3 de 8 pouces et 3 de 8.5 pouces de diamètre; elle a travaillé pendant 6 heures 14 minutes, et a donné très-régulièrement 62.31 coups de piston par minute. La pression effective dans la chaudière a été de 40.0 livres par pouce carré, sans variation sensible.

2e. Expérience. La machine met en jeu 3 pompes de 18 pouces de course et de 8 pouces de diamètre; elle a travaillé pendant 4 heures 42 minutes, et a donné 66.10 coups de piston par minute. La pression effective moyenne dans la chaudière a été de 40.34 livres par pouce carré (maximum, 41.5; minimum, 40).

3e. Expérience. La machine manœuvre les trois mêmes pompes; on cherche quelle est la moindre pression à laquelle elle puisse se maintenir en mouvement. La pression effective dans la chaudière étant de 16.5 livres par pouce carré, la machine maintient très-uniformément une vitesse de 40 coups de piston par minute.

4e. Expérience. La machine marche à vide, ou seulement avec son arbre d'engrenage sans pompes. La pression effective dans la chaudière étant de 5.0 livres par pouce carré, la machine donne régulièrement 24 coups de piston par minute.

Pendant ces expériences, la soupape a gorge a été, comme à l'ordinaire, dirigée par le gouverneur, sans intervention du machiniste, et dans son état tout-à-fait habituel pour les charges respectives de 6 pompes et de 3 pompes.

La quatrième expérience prouve que le frottement propre de la machine, avec son arbre et ses roues d'engrenage, exigeait, dans la vapeur et avant sa détente dans le cylindre, une pression de 5 livres, à très-peu près, par pouce carré de la surface du piston; la troisième, que la charge de la machine, avec 3 pompes, ne s'élevait pas au-delà de 16.5 livres par pouce carré sur le piston, avant détente; ce qui fait voir qu'avec 6 pompes, la charge ne pouvait excéder 29.48 lbs. avant détente.

Cela posé, les expériences offraient les résultats suivans :

Exp. III.	Pression effective dans la chaudière.	16.50	rapp. 1.
	dans le cyl., avant détente, à très-peu près..	16.50	
Exp. II.	Pression effective dans la chaudière.	40.34	rapp. 0.41.
	dans le cylindre, avant détente.	16.50	
Exp. I.	Pression effective dans la chaudière.	40,00	rapp. 0.74.
	dans le cylindre, avant détente.	29.48	

Ces expériences prouvent assez que toute supposition d'égalité ou même d'un rapport constant quelconque entre les deux pressions est nécessairement inexacte;

mais, pour qu'il ne puisse rester aucun doute à cet égard, nous en citerons encore quelques preuves tirées des machines de Cornwall ou des tracés d'*indicateur* obtenus dans ces machines. On sait que cet instrument, inventé par Watt et formé d'un ressort comprimé par la vapeur, trace sur une carte mobile et au moyen d'un crayon fixé à l'extrémité du ressort, une courbe qui indique la pression de la vapeur dans le cylindre, en chacun des points de la course du piston ; il est donc facile de comparer la pression de la vapeur dans le cylindre avec la pression qui existe au même instant dans la chaudière. Or, en examinant les tracés obtenus par ce moyen, on trouve une différence très-grande et très-variable entre les deux pressions, et l'on en aura la preuve en consultant ceux qui ont été relevés par M. Henwood, et consignés par lui dans les *Transactions de l'Institution des Ingénieurs civils de Londres*, année 1841 ; on y observera les rapprochemens suivans (*) :

DÉSIGNATION DES MACHINES.	PRESSION ABSOLUE dans la chaudière.	PRESSION ABSOLUE *maximum* dans le cylindre pendant l'admission de la vapeur.	RAPPORT des deux pressions.
	liv. par pouce car.	liv. par pouce car.	
Machine de Wilson, à Huel Towan.	61.8	27	0.44
Machine de Swan, à Binner Downs.	74.78	26	0.35
Même machine.	58	25	0.43
Machine de Burn, à Binner Downs.	55	30.5	0.55
Machine de Hudson, à East Crinnis.	36.8	25	0.68
Même machine.	26.3	21	0.80
Machine de Trelawny, à Huel Vor.	47	30.5	0.65
Machine de Borlase, à Huel Vor. .	40	30.5	0.76

Il résulte de ces observations que, dans les machines à vapeur stationnaires, la vapeur subit des réductions de pression tout aussi considérables et tout aussi peu proportionnelles à la pression dans la chaudière que dans les machines locomotives. Dans les exemples que nous venons de citer, on a vu le rapport entre les deux pressions prendre successivement toutes sortes de valeurs entre 0.35, 0.76 et 1. Si, pour déterminer les effets de ces machines, on avait employé l'un quelconque de ces coefficiens, on aurait commis des erreurs qui auraient varié entre les deux tiers et le quart des effets réels. Il n'est donc pas possible d'attendre la moindre exactitude de l'emploi d'un coefficient constant *quelconque* appliqué à la pression dans la chaudière, pour en conclure la pression effective de la vapeur dans le cylindre, ou les effets utiles qu'on peut attendre des machines.

(*) *On the expansive action of steam in some of the pumping engines on the Cornish mines*, by W. J. Henwood. *Transactions of the Institution of civil engineers*, vol. II, p. 59 et pl. IV.

Du reste, pour que ces résultats cessent de causer de la surprise aux personnes qui ont, jusqu'à présent, admis l'opinion qu'il ne pouvait y avoir que des différences insensibles entre la pression dans la chaudière et dans le cylindre, nous allons maintenant faire voir, par des considérations théoriques, que l'établissement de ces différences très-variables, qui se produisent pendant le travail normal des machines à vapeur, entre la pression dans la chaudière et la pression dans le cylindre, n'est qu'un effet très-naturel, et qu'on aurait pu prévoir *à priori*.

Pour cela, il est d'abord nécessaire d'examiner ce qui se produit lorsque la vapeur formée dans une chaudière s'écoule par un orifice quelconque. Supposons qu'une chaudière soit remplie de vapeur à une pression absolue quelconque donnée; qu'en outre, le feu, étant alimenté uniformément dans le foyer, il continue de se vaporiser par minute, dans la chaudière, une certaine quantité d'eau déterminée. Supposons encore que, les choses étant dans cet état, on ouvre subitement un orifice d'une grandeur connue, communiquant avec l'atmosphère, ou avec un vase renfermant un gaz à une pression constante. La vapeur commencera immédiatement à s'écouler, et, d'après les recherches théoriques connues à ce sujet, sa vitesse d'écoulement dépendra de la pression dans la chaudière et de la densité de la vapeur sous cette pression. En outre, la masse de vapeur écoulée par minute dépendra de la vitesse d'écoulement, de la densité de la vapeur qui s'écoule et de la grandeur de l'orifice de sortie. Donc, la masse de vapeur qui sortira de la chaudière variera selon la pression de la vapeur dans la chaudière, la densité de cette vapeur et l'aire de l'orifice.

Cela posé, s'il arrive que la masse de vapeur qui s'écoule ainsi par minute soit moindre que celle qui se forme dans la chaudière, pendant le même temps, la vapeur non écoulée s'amassera dans la chaudière; et comme l'espace qui lui est réservé est d'une étendue fixée et limitée, il est clair que la densité, et, par conséquent, la pression absolue de la vapeur dans la chaudière, augmenteront; donc aussi, la vitesse d'écoulement par l'orifice augmentera en même temps. Si, au contraire, la masse de vapeur qui s'écoule, par minute, en raison de la pression originale dans la chaudière, de la densité correspondante de la vapeur, et de la grandeur de l'orifice de sortie, est plus grande que la masse de vapeur qui continue de se former dans le même temps, il sortira de la chaudière plus de vapeur qu'il ne s'y en forme; donc la densité et la pression de la vapeur dans la chaudière diminueront, et, à mesure que ces deux quantités diminueront, la vitesse d'écoulement diminuera aussi. Par conséquent, dans ces deux cas, la pression, la densité et la vitesse de sortie de la vapeur augmenteront ou diminueront, c'est-à-dire que la pression qu'on aura momentanément produite dans la chaudière ne sera que transitoire, et qu'elle ne s'y maintiendra pas d'une manière permanente. Enfin, s'il arrive que la masse de vapeur qui s'écoule par minute soit exactement égale à celle qui se forme en même temps dans la chaudière, il est clair qu'il n'y aura plus aucune addition ni soustraction faite à la masse de vapeur enfermée dans

la chaudière, et, par conséquent, aucune cause d'accroissement ni de diminution dans sa densité, sa pression et sa vitesse d'écoulement; donc, dans ce cas, c'est-à-dire dans le cas du *régime* ou de l'égalité entre la dépense et la production de vapeur, il y aura permanence d'effets ou permanence dans la pression, la densité et la vitesse de la vapeur.

Or, en appelant P la pression absolue de la vapeur dans la chaudière, D sa densité, V sa vitesse de sortie sous l'influence de la pression P et de la densité D, O l'aire de l'orifice de sortie, et enfin S la masse d'eau vaporisée par minute dans la chaudière, la condition de l'établissement du régime sera exprimée par l'équation

$$S = OVD.$$

Donc, si cette équation a lieu, il y aura permanence d'effets dans la machine.

D'un autre côté, on sait que la densité de la vapeur, en contact avec le liquide et formée sous une pression donnée P, peut s'exprimer en fonction de cette pression, au moyen de formules connues, et nous avons nous-même, comme on le verra dans le chapitre II, présenté à cet égard une formule dont la température se trouve éliminée. Nous pouvons donc exprimer d'une manière générale la densité de la vapeur par une fonction f de sa pression absolue, de sorte qu'on a

$$D = f(P).$$

De même, la vitesse d'écoulement d'un gaz ou d'une vapeur, à la pression P et à la densité D, dans un autre gaz à une pression constante que nous représenterons par p, peut s'exprimer, avec une approximation suffisante, en fonction seulement de la pression P, de la pression p et de la densité D; mais comme nous venons de voir que, dans la vapeur en contact avec le liquide, la densité est elle-même connue en fonction de la pression, nous poserons aussi, d'une manière générale, que la vitesse d'écoulement de la vapeur pourra s'exprimer par une fonction des deux pressions P et p, ou qu'on aura toujours

$$V = \varphi(P, p).$$

Par conséquent, l'équation de condition spéciale et nécessaire du régime, ou de la permanence d'effets, deviendra

$$S = O\,\varphi(P, p)\,f(P);$$

de sorte qu'il suffira de prouver que cette équation existe, dans un cas donné, pour en conclure qu'alors les effets resteront permanens.

Supposons donc que le régime se soit d'abord établi avec la vaporisation S', la pression P' et l'orifice O', l'écoulement ayant lieu, d'ailleurs, de la chaudière dans un vase ou cylindre contenant de la vapeur à la pression invariable p; on aura l'équation

$$S' = O'\,\varphi(P', p)\,f(P') \ldots \qquad (a)$$

Supposons ensuite qu'on arrête la machine et qu'en changeant l'intensité du feu, on change la vaporisation dans la chaudière, de manière que celle-ci devienne S''; qu'on élève en même temps la pression dans la chaudière à la valeur P'' quelconque, mais seulement supérieure à p, et qu'on fixe l'orifice de sortie à la grandeur arbitraire O'' : il pourra, dans ces circonstances, y avoir ou n'y avoir pas régime ; mais il est clair que ce régime existera nécessairement toutes les fois qu'on aura l'équation

$$S'' = O'' \varphi(P'', p) f(P'').$$

Cela posé, pour chercher les cas où le régime aura lieu, supposons que dans le second cas, la vaporisation soit restée la même que dans le premier, ou qu'on ait

$$S'' = S',$$

et qu'en même temps, P'' ayant une valeur quelconque différente de P', on prenne, pour l'orifice O'', la valeur

$$O'' = O' \frac{\varphi(P', p) f(P')}{\varphi(P'', p) f(P'')};$$

nous disons que, sous ces conditions, le régime ou la permanence d'effets s'établira, car, en substituant, dans la dernière équation, pour

$$O' \varphi(P', p) f(P'),$$

sa valeur S', tirée de l'équation (a), on en déduira

$$O'' = \frac{S'}{\varphi(P'', p) f(P'')},$$

qui, en remplaçant S' par S'', qui lui est égal, donne

$$S'' = O'' \varphi(P'', p) f(P'').$$

Donc, dans les conditions supposées, le régime s'établira : c'est-à-dire que, dans le second cas, il pourra y avoir, dans le cylindre, même pression p que dans le premier cas, mais une pression différente et *quelconque* P'' dans la chaudière, pourvu que l'orifice d'écoulement O'' soit d'une grandeur convenable ; et ces effets se maintiendront d'une manière permanente.

De même, si l'on veut garder la même grandeur d'orifice dans les deux cas, ou faire O'' = O', nous disons qu'on produira encore la permanence d'effets, avec une pression P'' quelconque différente de la pression P' du premier cas, pourvu que la vaporisation soit telle qu'on ait

$$S'' = S' \cdot \frac{\varphi(P'', p) f(P'')}{\varphi(P', p) f(P')};$$

car, en substituant dans le second membre pour S' sa valeur, et fesant attention que $O'' = O'$, on retombera encore sur l'équation du régime.

Donc, en supposant que, dans un premier cas, le régime se soit établi avec une pression P', dans la chaudière, très-peu différente de la pression p dans le cylindre, le régime pourra également exister avec une pression P'' *quelconque*, c'est-à-dire, différant de la pression p du cylindre dans toutes sortes de proportions ; et pour cela, il suffira que l'ouverture de la soupape à gorge soit différente, si la vaporisation ne l'est pas, ou que la vaporisation dans la chaudière soit changée, si la soupape à gorge est restée invariable, ou enfin que ces deux quantités aient subi des variations simultanées. Or, on sait que la soupape à gorge d'une machine se prête à donner au passage de la vapeur toutes les grandeurs possibles, depuis une grandeur presque nulle, jusqu'à celle qui est fixée par le diamètre du tube à vapeur ; on sait également que la vaporisation de la chaudière peut être portée à tous les degrés qu'on voudra, depuis une valeur extrêmement petite jusqu'au maximum de vapeur qu'elle est capable de produire. Enfin, on sait qu'entre des machines diverses, il y a des différences très-considérables, tant sous le rapport des passages de la vapeur que sous celui de la vaporisation ; donc, non-seulement dans deux machines différentes, mais encore dans la même machine, travaillant dans des circonstances différentes, on ne peut admettre que la même proportion puisse se conserver entre la pression dans la chaudière et la pression dans le cylindre ; et il dépendra du machiniste, ou du constructeur de la machine, et sans que l'un ou l'autre le sache ou s'en soit rendu compte, d'établir, pour une charge donnée de la machine, une proportion quelconque entre la pression dans la chaudière et la pression dans le cylindre.

On voit donc, d'après toutes les preuves énumérées dans ce paragraphe et dans le précédent, que la pression de la vapeur dans le cylindre des machines à vapeur stationnaires ou locomotives, ne peut, sans erreur, être considérée comme égale ou proportionnelle à la pression dans la chaudière ; mais que la pression dans le cylindre est strictement réglée par la résistance sur le piston, et que toute méthode qui revient à admettre qu'elle serait à la pression de la chaudière dans un rapport fixe quelconque, est nécessairement inexacte.

Toutefois, il est essentiel d'observer que nous voulons établir, par ces raisonnemens, que la pression dans le cylindre ne peut dépendre de la pression dans la chaudière, puisqu'elle est fixée *à priori* ; mais nous croyons au contraire, comme on le verra dans le paragraphe suivant de ce chapitre, et § III, article I, du chapitre IV de cet ouvrage, que la pression dans le cylindre étant une fois réglée par la résistance sur le piston, celle de la chaudière en dépend ensuite, en raison de la grandeur des passages, de la masse de vapeur produite et du poids des soupapes de sûreté. Ce ne serait que faute de faire, comme on le doit, cette distinction, qu'on pourrait croire que nous admettons une indépendance complète entre les deux pressions.

§ VI. *Comparaison des deux théories par l'expérience.*

Ce qui précède établit suffisamment, en principe, l'exactitude de la théorie que nous proposons et l'inexactitude de celle qui a été employée jusqu'ici; cependant, pour qu'on puisse mieux apprécier le mode de procéder de chaque méthode, nous allons maintenant les examiner toutes deux dans leur application pratique. En les voyant fonctionner simultanément, on reconnaîtra facilement laquelle marche d'accord avec les faits, et l'on se fera une idée plus nette des causes d'où proviennent les écarts de l'une ou de l'autre.

Pour cela, nous retournerons aux deux premières expériences rapportées dans le paragraphe précédent et qui ont été faites sur la machine à haute pression, sans détente, de la distribution publique des eaux de la ville de Brighton, en Angleterre. En se reportant à ce qui a été dit page 21, on verra que les dimensions de cette machine sont : diamètre du cylindre, 16 pouces ou 1. 333 pied anglais; course du piston, 3 pieds; et que, dans les deux expériences citées, elle a donné les résultats suivans :

1re EXPÉRIENCE. La machine a manœuvré 6 pompes d'épuisement, dont trois de 8 pouces et trois de 8. 5 pouces de diamètre; elle a travaillé 6 heures 0 minute en vaporisant 143.285 pieds cubes d'eau, ce qui fait 0. 398 pied cube par minute. La vitesse du piston a été de 56.11 courses ou 168.33 pieds par minute, la pression effective dans la chaudière étant de 39.79 livres par pouce carré, ou la pression absolue (pression atmosphérique comprise) de 54.50 livres par pouce carré.

2e EXPÉRIENCE. La machine a manœuvré 3 pompes de 8 pouces de diamètre; elle a travaillé 4 heures 50 minutes en vaporisant 89.052 pieds cubes d'eau, ce qui fait 0.307 pied cube par minute. La vitesse du piston a été de 57.30 courses ou 171.9 pieds par minute, la pression effective dans la chaudière étant de 40.42, ou la pression absolue de 55.13 livres par pouce carré.

On a vu, en outre, que, d'après l'expérience directe, la résistance des trois pompes, ou la charge du piston dans le second cas, se montait à 15.50 livres par pouce carré, et que la résistance des six pompes, dans le premier cas, se montait à 29.05 livres par pouce carré. On a donc ainsi tous les élémens nécessaires pour établir la comparaison des deux théories.

Cela posé, si l'on calcule, d'une part l'effort théorique appliqué sur le piston, d'après le calcul ordinaire, et d'autre part l'effort réellement produit, savoir, la résistance opposée par la charge, plus la pression atmosphérique contre le piston, on trouve, en rapportant l'aire du piston au pied carré :

1er. CAS. Effort théorique appliqué sur le piston, d'après le calcul ordinaire,

$1.3963 \times (54.50 \times 144)$.	10958 lbs.
Effort réel, $1.3963 \times (29.05 + 14.71) \times 144$.	8799
Coefficient de correction.	0.80

2e. Cas. Effort théorique, d'après le calcul ordinaire, 1.3963×(55.13×144). 11085
Effort réel, 1.3963 × (15.50 + 14.71) × 144. 6074

Coefficient de correction. 0.55

Le coefficient moyen entre les deux précédentes est 0.67, et l'on remarquera que ces coefficiens sont différens de ceux que nous avons obtenus dans le paragraphe précédent, parce qu'ici ils sont déduits du rapport des pressions *absolues* de la vapeur, au lieu d'être déduits, comme précédemment, du rapport des pressions *effectives*, et la confusion qui peut se produire à cet égard n'est qu'une nouvelle cause d'erreur dans le calcul ordinaire.

Nous avons donc, par le calcul qui précède, trois coefficiens différens. Qu'on choisisse le premier, on fera erreur dans le second cas; qu'on choisisse le second, on fera erreur dans le premier cas; qu'on choisisse le troisième, on ne fera que partager l'erreur entre les deux cas. De toute manière, on est donc assuré de faire erreur, et cela suffirait à soi seul pour prouver que toute méthode, comme la théorie ordinaire, qui consiste dans l'emploi d'un coefficient constant, est nécessairement erronée; mais, pour arriver à connaître l'étendue des erreurs auxquelles on peut être conduit par cette méthode, supposons qu'on fasse le calcul des effets de la machine avec le coefficient moyen déterminé ci-dessus : on aura

1er. Cas. Effort pratique appliqué sur le piston, d'après le calcul ordinaire,
avec le coefficient moyen, 1.3963 × (54.50 × 144) × 0.67. . . 7342 lbs.
Effort réel, comme ci-dessus. 8799

Erreur en moins. 1457

2e. Cas. Effort pratique d'après le calcul ordinaire, 1.3963(55.13×144)×0.67. 7427
Effort réel, comme ci-dessus. 6074

Erreur en plus. 1353
Erreur moyenne des deux cas. . . . . 1405 lbs.

On voit donc qu'on aurait commis une très-grande erreur si l'on avait voulu calculer les effets de cette machine d'après le coefficient moyen 0.67, quoique ce coefficient ait été déterminé pour la machine elle-même; mais on voit en même temps qu'en appliquant tout autre coefficient *quelconque*, l'erreur n'aurait fait que se reporter d'un cas sur l'autre sans jamais disparaître, ce qui exclut entièrement l'usage des coefficiens. Il est évident, du reste, que le même fait se présenterait dans toute autre espèce de machine à vapeur; seulement il pourrait être moins marqué si les charges imposées à la machine étaient moins différentes, et c'est ce qui a empêché jusqu'ici d'apercevoir l'erreur de cette méthode, parce que toutes les machines d'un même système étant imitées les unes des autres et marchant à peu près à la même vitesse, d'après une limite factice qu'on avait posée pour la vitesse du piston, il a pu arriver que le même coefficient de correction ait paru leur convenir tolérablement.

D'ailleurs, dans la plupart des cas, comme on ne connaissait pas le frottement réel de la machine, on a pu imaginer que la différence entre le calcul et l'expérience pouvait en grande partie provenir de ce qu'on avait négligé de tenir compte de ce frottement; mais ici un tel effet ne peut être supposé, puisque dans la résistance du piston nous avons compris le frottement lui-même, comme on l'a vu plus haut; ainsi l'erreur que nous venons de trouver ne peut être attribuée à cette cause. Quant aux fuites de vapeur, nous devons déclarer que la machine soumise à l'expérience n'en présentait pas le plus petit vestige; et enfin, quant à la condensation de la vapeur, ou sa réduction partielle à l'état liquide, nous ferons observer que, dans la machine en question, le cylindre était garni d'une double enveloppe qui le garantissait contre tout refroidissement extérieur, et que la pression de la vapeur n'était pas observée dans la chaudière même, mais dans le tube à vapeur, en un point peu éloigné de son entrée dans le cylindre. Il est donc impossible d'admettre que, dans le court intervalle que la vapeur avait encore à traverser pour parvenir au cylindre, la condensation ait pu faire baisser sa pression effective aussi considérablement et surtout aussi inégalement, savoir, dans le second cas, de 40.42 à 13.50 livres par pouce carré ou des deux tiers, et dans le premier cas, de 39.79 à 29.03 livres par pouce carré ou de un quart seulement, les moyens de protéger la vapeur contre le refroidissement extérieur étant d'ailleurs les mêmes dans les deux cas. Ainsi nous devons conclure qu'il n'y a aucun moyen d'expliquer l'erreur que vient de nous donner le calcul de la théorie ordinaire, si ce n'est en admettant que cette théorie est fautive en elle même; et effectivement si la vapeur diminuait de pression en entrant dans le cylindre, ce n'était nullement par l'effet de la condensation, mais seulement parce que la vapeur s'y mettait en équilibre avec la résistance, comme nous avons prouvé que cela doit être.

Pour appliquer maintenant notre formule au même problème, savoir,

$$aR = \frac{qSP}{v},$$

tout se réduit à mettre pour les lettres q, S, P et v leurs valeurs, en ayant soin seulement de rapporter toutes les mesures à la même unité.

Ainsi, P est la pression absolue de la vapeur dans la chaudière, savoir : dans le premier cas, $P = 54.50 \times 144 = 7848$ livres par pied carré, et dans le second cas, $P = 55.13 \times 144 = 7939$ lbs par pied carré.

q est le rapport du volume de la vapeur, sous la pression absolue de 54.50 et et 55.13 livres par pouce carré, au volume d'un même poids d'eau; et, d'après les tables qu'on donnera dans le chapitre suivant, $q = 510$ pour le premier cas, et $q = 506$ pour le second cas.

S est le volume d'eau vaporisé par minute et utilisé dans le cylindre, et nous avons dit que ce volume brut a été de 0.398 pied cube dans le premier cas, et de 0.307

pied cube dans le second ; mais comme nous verrons, dans le cours de cet ouvrage, que dans les chaudières à vapeur, il y a un enlèvement d'eau liquide mêlée à la vapeur, qu'on peut, dans les machines stationnaires, évaluer à environ 0.05 de la vaporisation brute, et qui est beaucoup plus considérable dans les locomotives, nous ne devons prendre, pour la vaporisation *effective*, ou pour la vapeur de S, que 0.95 des deux nombres ci-dessus, savoir : S = 0.378 pour le premier cas, et S = 0.292 pour le second cas.

Enfin v est la vitesse du piston, savoir, 168.33 et 171.9 pieds par minute respectivement; rien n'est donc plus facile que d'exécuter le calcul nécessaire.

En effet, la formule donne :

1er. Cas. Effort appliqué par la machine, d'après la nouvelle théorie,

$\frac{510 \times 0.378 \times 7848}{168.33}$ . . . . 8990 lbs.

Effort réel, comme ci-dessus. 8799

Erreur. 191

2e. Cas. Effort appliqué d'après la nouvelle théorie, $\frac{506 \times 0.292 \times 7939}{171.9}$ 6818

Effort réel, comme ci-dessus. 6074

Erreur. 744

Erreur moyenne des deux cas. . . . . 467 lbs.

On voit donc que l'on arrive à l'effet produit, avec une différence de 467 livres seulement; tandis que la théorie ordinaire donne une erreur moyenne et inévitable de 1405 livres, qui, dans le premier cas, est plus du $\frac{1}{5}$ de l'effet réel *utilisable* (c'est-à-dire, déduction faite de la pression atmosphérique), et, dans le second cas, plus du $\frac{1}{3}$ de ce même effet réel; et l'on remarquera que cette différence de 467 lbs, elle-même, tient en partie à ce que nous n'employons ici la théorie proposée que d'une manière *approximative*, afin de présenter le calcul sous sa forme la plus simple. C'est ce que l'on pourra reconnaître dans le chapitre V, article III, quand nous donnerons aux formules leur entier développement.

2°. Pour continuer la même comparaison des deux théories, supposons qu'on veuille calculer quelle quantité d'eau la chaudière doit vaporiser par minute, pour produire, soit le premier effet, soit le second. Le mode de calcul suivi par la théorie ordinaire consiste, comme nous l'avons dit, à supposer d'abord que le volume décrit par le piston a été rempli de vapeur à la même pression que dans la chaudière, puis à y appliquer un coefficient, pour tenir compte des pertes.

Or, dans le premier cas, le volume décrit par le piston, à la vitesse donnée, est

$$av = 1.3963 \times 168.33 = 235.0 \text{ pieds cubes.}$$

Si ce volume avait été rempli de vapeur à la pression de la chaudière, il aurait nécessité une vaporisation effective de

$$\frac{235}{510} = 0.461 \text{ pied cube d'eau};$$

mais la vaporisation réelle n'a été que 0.378 : il faut donc, pour ce premier cas, appliquer à la vaporisation théorique le coefficient

$$\frac{0.378}{0.461} = 0.82.$$

Dans le second cas, la vaporisation comptée de même, en supposant que la vapeur ait agi dans le cylindre, à la pression de la chaudière, est

$$\frac{1.3963 \times 171.9}{506} = 0.474 \text{ pied cube d'eau};$$

ainsi, pour ce cas, le coefficient nécessaire est 0.62. Donc, pour ce problème aussi bien que pour le précédent, un coefficient constant *quelconque* ne pourrait satisfaire.

Si cependant on fait le calcul avec le coefficient moyen 0.72, on trouve :

1er. Cas. Vaporisation, en pieds cubes d'eau par minute, calculée par la théorie ordinaire, avec le coefficient moyen, $\frac{1.3963 \times 168.33}{510} \times 0.72$. . . 0.332

Vaporisation réelle. 0.378

Erreur en moins. 0.046

2e. Cas. Vaporisation, en pieds cubes d'eau par minute, calculée par la théorie ordinaire, $\frac{1.3963 \times 171.9}{506} \times 0.72$. 0.342

Vaporisation réelle. 0.292

Erreur en plus. 0.050

Erreur moyenne. 0.048

L'erreur moyenne commise est donc de $\frac{1}{8}$ sur la vaporisation; et, par cela même que c'est une moyenne, elle peut, dans les cas extrêmes, devenir le double.

C'est l'erreur commise quand on cherche un coefficient *exprès* pour la vaporisation; mais lorsqu'au lieu de cela, on emploie en diviseur, comme le font la plupart des auteurs, le coefficient déterminé dans le problème précédent, par la comparaison des effets théorique et pratique, on arrive à des erreurs bien plus considérables encore, car on trouve :

1er. Cas. Vaporisation, en pieds cubes d'eau par minute, calculée par la théorie ordinaire avec le coefficient des effets utiles, en diviseur,

$\frac{1.3963 \times 168.33}{510 \times 0.67}$ 0.688

Vaporisation réelle. 0.378

Erreur. 0.310

2e. Cas. Vaporisation, en pieds cubes d'eau par minute, calculée par la théorie ordinaire, $\frac{1.3963 \times 171.9}{506 \times 0.67}$ 0.708

Vaporisation réelle. 0.292

Erreur. 0.416

Dans notre méthode, au contraire, la vaporisation nécessaire pour que la résistance aR soit mise en mouvement à la vitesse v, est donnée par la formule

$$S = \frac{aR \times v}{qP}.$$

On a donc, pour la vaporisation, en pieds cubes d'eau, par minute:

1er. Cas. Vaporisation calculée par la nouvelle théorie, $\frac{8799 \times 168.33}{510 \times 7848}$ . . . 0.370

Vaporisation réelle. 0.378

Erreur. 0.008

2e. Cas. Vaporisation calculée par la nouvelle théorie, $\frac{6074 \times 171.9}{506 \times 7939}$ 0.260

Vaporisation réelle. 0.292

Erreur. 0.032

Erreur moyenne. . . . 0.020

3e. Enfin, pour le cas où l'on voudrait trouver la vitesse du piston en supposant la résistance donnée, toute méthode semblable à la méthode ordinaire ne pourrait encore conduire qu'à des erreurs; mais nous sommes dispensés de toute comparaison, puisque ce problème n'a jamais été résolu.

Nous nous bornerons donc à montrer la vérification de notre théorie. La formule relative à ce problème est

$$v = \frac{qSP}{aR};$$

ainsi l'on trouve:

1er. Cas. Vitesse du piston, en pieds par minute, calculée d'après la nouvelle théorie, $\frac{510 \times 0.378 \times 7848}{8799}$. 172.00

Vitesse réelle 168.33

Différence 3.67

2e. Cas. Vitesse du piston, en pieds par minute, calculée d'après la nouvelle théorie, $\frac{506 \times 0.292 \times 7939}{6074}$. 192.94

Vitesse réelle 171.90

Différence 21.04

Par conséquent, on voit que, dans chacun des trois problèmes dont il est question, la nouvelle théorie s'approche beaucoup des résultats réels, tandis que la théorie ordinaire, outre qu'elle ne résout pas le troisième problème, conduit dans les deux autres à de très-grandes erreurs. Et l'on remarquera qu'en employant, comme nous venons de le faire, les coefficiens relatifs à la pression *absolue* de la vapeur dans la chaudière, déterminés sur la machine elle-même, et en tenant compte des frottemens, nous avons fait le calcul de la manière la plus favorable à l'ancienne théorie; car, lorsqu'on prend les coefficiens qui sont relatifs à la pression *effective* de la vapeur, et sans tenir compte des frottemens, comme ces coefficiens diffèrent bien plus entre eux, ils introduisent une plus grande incertitude dans le calcul; et si, de plus, on a recours à des coefficiens généraux déduits de machines qui peuvent différer considérablement de celle que l'on considère, on ne peut attendre de leur emploi que de plus grandes erreurs encore.

Enfin, avant de quitter ce sujet, nous ferons encore remarquer, dans le calcul de la théorie ordinaire, quelques circonstances dont nous avons parlé déjà, mais qui se trouvent ici tout-à-fait mises en évidence, et qui expliquent assez la cause des écarts observés. La première, c'est que, dans les calculs de cette théorie, l'effort utile ou la charge de la machine, au lieu de varier selon la vitesse du mouvement, reste, au contraire, totalement indépendante de cette vitesse, puisque le calcul consiste uniquement à multiplier l'aire du piston par la pression de la chaudière, et à réduire le produit dans une proportion constante. Ainsi, cette théorie soutient en principe qu'à toutes les vitesses qu'on voudra imaginer, la machine pourra toujours tirer la même charge. La seconde, c'est que, dans ce même calcul, savoir, celui de la charge ou de l'effort appliqué, la vaporisation de la machine ne figure en aucune manière: ce qui signifierait que la machine tirerait toujours la même charge à toutes les vitesses, et cela quelle que soit la vaporisation de la chaudière; ce qui est impossible. Enfin, la troisième, c'est que, dans le calcul de la théorie ordinaire pour trouver la vaporisation de la machine, on ne voit pas figurer la résistance qu'est censée tirer cette

machine ; de sorte que la vaporisation nécessaire pour tirer une résistance donnée serait indépendante de cette résistance ; autre résultat pareillement impossible.

C'est donc à ces omissions, que nous regardons comme des erreurs de principe, et aux autres causes déjà signalées, que l'on doit attribuer les écarts de la théorie ordinaire pour les exemples proposés.

§ VII. *De l'aire des passages de la vapeur.*

Il reste encore un point qu'il est nécessaire d'examiner, c'est l'influence de l'aire des passages de la vapeur, ou de l'ouverture plus ou moins grande de la soupape à gorge, ou du régulateur, sur les effets produits par la machine.

Dans la théorie ordinaire, on reconnaît à cette ouverture un effet très-important dans la machine, puisqu'on dit qu'en l'augmentant ou en la diminuant, on est libre de produire dans le cylindre la pression que l'on voudra. Cependant, on ne donne aucun moyen de tenir compte de cette ouverture dans le calcul ; à moins que, obligés déjà d'avoir un coefficient pour les effets utiles, et pour chaque espèce de machine, et un autre pour la vaporisation, modifié de même pour chaque système de machines, et, en outre, un coefficient différent pour toutes les vitesses, on ne veuille encore que nous en changions pour chaque ouverture du régulateur. Mais on ne donne pas ces coefficiens, et quoiqu'on reconnaisse que l'action de la machine change avec l'ouverture du régulateur, on calcule toujours de même, et avec le même coefficient, quelle que soit cette ouverture.

Or, quand une machine stationnaire fonctionne, son régulateur ou soupape à gorge est constamment en mouvement par l'effet du *gouverneur*, et, en quelque sorte, à l'insu du machiniste. Le calcul de la théorie ordinaire sera donc continuellement mis en défaut ; il sera inexact pour tous les cas et pour tous les instants où le régulateur se trouvera avoir une ouverture différente de celle à laquelle le coefficient employé aura été déterminé.

Dans la théorie que nous proposons, au contraire, nous tenons compte de l'ouverture de ce régulateur, ou du moins des effets qu'il produit, quoique sa mesure directe ne paraisse pas ostensiblement dans les équations. Pour que ce fait soit tout à fait clair, nous établirons avant tout quels sont les véritables effets du régulateur.

Nous prouverons d'abord que le degré d'ouverture du régulateur ne peut avoir aucune influence sur la pression dans le cylindre, mais que c'est au contraire sur la pression *dans la chaudière* qu'il réagit ; ensuite, nous montrerons que, quel que soit le rétrécissement du régulateur, les formules en tiendront toujours compte et continueront de donner les vrais effets produits ; et enfin, nous examinerons quels sont, dans chaque circonstance, les changemens survenus dans ces effets, en raison du rétrécissement de l'orifice du régulateur.

1°. Dans la théorie ordinaire, on suppose que, la pression de la vapeur dans la chaudière étant donnée et fixe, on peut, en rétrécissant plus ou moins l'orifice du

régulateur, produire à volonté une certaine pression dans le cylindre. Mais nous avons prouvé que la pression dans le cylindre est, au contraire, toujours strictement déterminée, *à priori,* par la résistance sur le piston; la plus ou moins grande ouverture du régulateur ne peut donc y produire aucun changement. D'ailleurs, comment le rétrécissement du passage pourrait-il changer la *pression* de la vapeur qui sort par ce passage? Il en changera bien, si l'on veut, la *quantité*, parce que la petitesse de l'ouverture s'opposera à ce qu'il en puisse passer davantage en un temps donné, mais il n'en pourra certainement changer la *pression*. En effet, il arrivera toujours qu'à mesure que la vapeur, en pénétrant dans le cylindre, y acquerra la pression de la résistance, le piston fuira sans lui laisser prendre une pression plus considérable. Et, si l'on veut supposer que par l'agrandissement du passage, la vapeur arrive 10 fois, 20 fois, 30 fois plus vite, le piston fuira 10 fois, 20 fois, 30 fois plus vite aussi, puisque son mouvement est le résultat de l'arrivée de cette vapeur; mais jamais la pression dans le cylindre ne pourra dépasser la résistance du piston, parce que le piston n'étant autre chose qu'une soupape pour le cylindre, ce serait supposer une chaudière dans laquelle la pression de la vapeur serait plus grande que la pression de la soupape.

Ainsi, le régulateur ne peut rien changer à la pression dans le cylindre, mais voici ce qui arrive. La quantité de vapeur d'une densité donnée, qui s'écoule dans un milieu fixe par un orifice déterminé, étant en raison de l'aire de cet orifice, il s'ensuit que quand on rétrécira l'orifice du régulateur, on diminuera par cela même la *quantité* de vapeur, à la pression de la chaudière, qui passe dans le cylindre. Cependant, il s'en produit toujours la même quantité dans la chaudière; cette vapeur, qui a cessé de trouver un écoulement vers le cylindre, s'accumulera donc dans la chaudière, et s'y élèvera à une densité et une force élastique de plus en plus grandes, jusqu'à ce qu'enfin elle puisse s'écouler quelque part : par exemple jusqu'à ce que, ayant acquis la pression nécessaire pour soulever les soupapes de sûreté, elle puisse s'échapper dans l'atmosphère. Alors il s'établira un régime, d'après lequel le trop plein de la vapeur formée, au delà de ce qui peut parvenir au cylindre, trouvera un écoulement constant par les soupapes de sûreté, et le reste passera par l'orifice du régulateur et ira dans les cylindres produire le mouvement du piston. A partir de ce moment tout se conservera dans le même état, et la pression dans la chaudière restera élevée comme elle doit continuer de l'être, pour maintenir la soupape ouverte et permettre l'écoulement de la vapeur à mesure qu'elle se forme.

On voit par là que le rétrécissement plus ou moins grand du régulateur ne peut avoir aucune action sur la pression du cylindre, mais qu'il en a une directe sur la pression de la chaudière.

2° Nous venons de dire qu'à mesure qu'on rétrécira l'orifice du régulateur, la pression de la vapeur montera dans la chaudière, et que sa densité croîtra en même temps; et tant que la vapeur n'aura pas trouvé d'issue pour s'échapper en totalité,

à mesure de sa production, cet accroissement de force élastique et de densité continuera ; car nous supposons qu'il continue toujours de se produire la même masse de vapeur par minute dans la chaudière, ou qu'on conserve le feu dans le même état. Or, la vapeur se trouve contenue dans la chaudière par deux obstacles : l'orifice du régulateur qui s'oppose à son passage en raison de la densité, et la soupape de sûreté qui s'oppose à son passage en raison de la pression. Il pourra donc maintenant se présenter deux cas, selon celui de ces deux obstacles qui cédera le premier : ou bien la vapeur, en continuant d'acquérir de la densité, finira par en avoir une telle, que son volume sera assez réduit pour pouvoir s'écouler en totalité par l'orifice du régulateur, malgré le rétrécissement de celui-ci; ou bien, au contraire, la soupape de sûreté offrant moins de résistance à la force élastique que l'orifice n'en offre à la densité, la vapeur s'écoulera par la soupape de sûreté.

Dans le premier de ces deux cas donc, la machine se réglera ainsi : dans le cylindre, comme toujours, la pression de la résistance, et dans la chaudière, la pression nécessaire pour que la densité correspondante de la vapeur lui permette de s'écouler en totalité par l'orifice donné du régulateur.

Et dans le second cas, la machine se réglera au contraire de cette manière : dans le cylindre toujours la pression de la résistance, et dans la chaudière, celle de la soupape de sûreté.

A présent, il faut donc que nous considérions séparément chacun de ces deux cas.

Supposons que la soupape de sûreté étant fixée à une très-haute pression, et l'orifice du régulateur n'ayant au contraire éprouvé qu'un rétrécissement *très-modéré*, la vapeur, en s'accumulant dans la chaudière, ait acquis la densité qui permet son écoulement par l'orifice, avant d'avoir acquis la pression qui permet son écoulement par la soupape. Alors il arrivera que la *totalité* de la vapeur produite passera toujours dans le cylindre, qu'elle y prendra toujours la pression de la résistance, en s'y dilatant en proportion; et qu'en divisant le volume de la vapeur ainsi dilatée par l'aire du cylindre, on aura toujours la vitesse d'écoulement par le cylindre, qui n'est autre chose que la vitesse du piston. Ainsi, tout se passera dans la machine comme auparavant, et, par conséquent, les effets produits seront toujours donnés par les mêmes formules, en y mettant, toutefois, pour P la nouvelle pression qui s'est produite dans la chaudière, et pour S la nouvelle vaporisation, si cette vaporisation a changé en raison du changement de pression.

Supposons maintenant que la soupape de sûreté se trouve fixée à une pression très-peu élevée, et que le régulateur subisse au contraire un rétrécissement considérable, tel que la vapeur puisse soulever la soupape, avant l'instant où elle aurait acquis la densité convenable à son écoulement total par le régulateur. Alors donc, cette soupape sera soulevée, et une partie de la vapeur qui continue à se former dans la chaudière se perdra dans l'atmosphère; et, nécessairement, les effets de la

machine seront réduits d'autant. Mais que l'on observe maintenant qu'à l'égard de la portion de vapeur qui n'est pas perdue, c'est-à-dire de celle qui trouve son écoulement vers le cylindre, il sera toujours vrai de dire qu'elle y prendra la pression de la résistance, et y jouera le même rôle qu'y jouait auparavant la masse totale de la vapeur. Il n'y aura donc de différence qu'en ce que les effets produits, au lieu d'être dus à la *totalité* de la vapeur, seront dus maintenant à une portion seulement de cette vapeur.

Ainsi, pourvu que nos formules tiennent compte de cette différence, elles tiendront, par cela seul, compte de tout le changement survenu. Or, c'est précisément ce qu'elles font, car nous avons dit que la quantité S, qui figure dans ces formules, représente la vaporisation *effective* de la machine, c'est-à-dire celle qui est réellement transmise aux cylindres ; ou si l'on veut, la vaporisation *totale*, moins celle qui se perd par la soupape de sûreté. Il suffira donc de mettre pour S la véritable valeur convenable à ce cas, et les formules continueront de représenter ce qui se passe dans la machine.

Comme la quantité *totale* d'eau vaporisée dans un temps donné se mesure directement dans les réservoirs d'alimentation, tout se réduit à savoir comment on évaluera celle qui se perd par les soupapes de sûreté, afin de la soustraire de la première. Cette évaluation se fera facilement en prenant note de la hauteur dont la soupape de sûreté est soulevée dans le moment de la perte, ce que la longueur des leviers des soupapes et l'échelle graduée dont elles sont pourvues permet de faire aisément; puis on fermera complètement le régulateur, afin d'obliger ainsi la *totalité* de la vapeur produite à s'échapper par la soupape, et l'on notera de même le soulèvement de soupape qui en résultera. Alors, la proportion du premier soulèvement au second donnera le rapport de la vapeur perdue à la vapeur totale produite. C'est le moyen que nous avons employé pour les locomotives. Si cette évaluation ne paraît pas assez précise, on condensera la vapeur perdue dans un vase séparé, et l'on mesurera la quantité d'eau qu'elle a produite. Il sera donc toujours facile de connaître la vaporisation *effective* de la machine, et, par conséquent, en l'introduisant dans la formule, on continuera d'avoir les vrais effets produits.

Dans les deux cas qui précèdent, nous avons supposé que la chaudière continue, après le rétrécissement du régulateur, de produire la même quantité de vapeur. Actuellement, il peut se présenter un troisième cas, c'est celui où le machiniste, au moment où il verra souffler la soupape, baissera le *modérateur*, et réduira son feu de manière à empêcher le soufflement de la soupape. Alors, la masse de vapeur produite par minute diminuera; mais, comme il est toujours clair que la quantité qui est produite, quelque peu considérable qu'elle soit, agira toujours dans la machine de la même manière, il s'ensuit que, pourvu que nous mettions dans les formules cette nouvelle vaporisation, nous aurons aussi les nouveaux effets correspondans. Ainsi, pour ce troisième cas, comme pour les deux autres, les formules satisferont toujours, dès qu'on y fera les substitutions propres au cas supposé.

3°. A présent, il convient d'examiner quels changemens les effets de la machine subiront dans les trois suppositions précédentes. Nous avons vu que les formules exposées donneront toujours ces effets, moyennant les substitutions convenables. Examinons donc les résultats de ces substitutions.

Dans le premier cas, savoir : le feu continué au même état d'intensité et l'orifice du régulateur rétréci, sans l'être assez pour faire souffler la soupape de sûreté, la pression P dans la chaudière devient plus considérable. Mais, dans les formules exposées, la pression P ne figure que multipliée par q, qui est le volume *spécifique* de la vapeur. Comme ce volume est inverse à la densité, et que la densité varie elle-même à très-peu près, en raison directe de la pression, il s'ensuit, qu'à moins d'un changement de pression trés-considérable, le produit qP restera sensiblement constant. Si l'on suppose, comme on l'admet généralement, que la vaporisation d'une chaudière donnée est la même sous différentes pressions de la vapeur, la quantité S ne variera pas non plus. Donc, dans ce cas, les formules donneront encore les mêmes résultats; et, par conséquent, la machine produira les mêmes effets, après le rétrécissement du régulateur qu'avant que ce rétrécissement ait eu lieu.

Dans le second cas, savoir : rétrécissement du régulateur accompagné d'un soufflement de soupape, il y a encore augmentation de pression dans la chaudière, ce qui, comme on vient de le voir, ne produit pas de changement dans les effets. Mais, en outre, il y a une certaine perte par les soupapes, et cette perte diminue d'autant la vaporisation *effective* S. Donc, il y aura une diminution d'effet précisément proportionnelle à la quantité de vapeur perdue par la soupape, et que nous avons donné le moyen de mesurer.

Enfin, dans le troisième cas, savoir : rétrécissement de régulateur accompagné d'une réduction dans l'intensité du feu, on n'a supprimé le soufflement de la soupape qu'en produisant dans la chaudière une moindre masse de vapeur. Mais dès que cette masse de vapeur produite et transmise au cylindre est moindre qu'avant le rétrécissement du régulateur, il s'ensuit que l'effet produit par la machine, ou le résultat donné par la formule, sera réduit d'autant. Ainsi, ce troisième cas est pareil au second, et sera de même accompagné d'une réduction d'effet.

Le premier des trois cas que nous venons de signaler est celui qui a lieu, sans que nous y fassions la moindre attention, toutes les fois que l'orifice du régulateur n'est que faiblement diminué.

Le second se présente continuellement dans les machines locomotives, parce que ces machines, ayant à surmonter des résistances fort variables, selon les inclinaisons de la route qu'elles parcourent, il est nécessaire d'y entretenir un feu bien soutenu, et de les tenir toujours prêtes à développer au besoin un surcroît de puissance.

Le troisième est celui qui a lieu constamment dans les machines stationnaires, quand le rétrécissement du régulateur y est un peu considérable, parce que ce régulateur n'y étant jamais réduit que lorsque l'ouvrage de la machine réclame,

moins de force, on s'empresse de profiter de cette circonstance pour diminuer l'intensité du feu et ne produire que la vaporisation strictement nécessaire.

Ces trois cas peuvent donc se présenter dans les diverses machines, mais les formules exposées s'y adapteront toujours.

Du reste, les considérations que nous venons de présenter, relativement à l'aire des passages de la vapeur, recevront une nouvelle confirmation par les développemens contenus dans le § III, article I, du chapitre IV de cet ouvrage.

§ VIII. *Des différences qui existent entre la théorie proposée et l'ancienne.*

En terminant cet exposé général de notre manière d'envisager l'action de la vapeur dans les machines, nous résumerons en peu de mots les différences qui existent entre la méthode que nous proposons et celle qui a été en usage jusqu'ici.

1°. La théorie ordinaire passe des effets théoriques aux effets pratiques au moyen d'un coefficient constant.

La nôtre rejette entièrement l'emploi de ce coefficient, qu'elle regarde comme résultant d'une erreur fondamentale dans le calcul de ce qu'on nomme les effets théoriques.

2°. La théorie ordinaire ignore quelle est la pression dans le cylindre; elle cherche à la déduire de celle de la chaudière.

La nôtre détermine, *à priori*, la pression du cylindre, comme étant, non pas égale ou proportionnelle à celle de la chaudière, mais égale à celle de la résistance sur le piston.

3°. La théorie ordinaire détermine la charge que peut tirer la machine sans que la vitesse entre dans son calcul; c'est-à-dire qu'elle soutient qu'à toutes les vitesses qu'on voudra imaginer, la machine tirera toujours la même charge.

La nôtre introduit la vitesse dans le calcul, de telle sorte que plus la vitesse est grande, moindre est la charge que peut tirer la machine.

4°. La théorie ordinaire calcule la vaporisation de la machine pour une résistance et une vitesse données, sans considération de la résistance; c'est-à-dire qu'elle soutient encore que la vaporisation nécessaire pour effectuer le mouvement serait indépendante de la résistance à mouvoir.

La nôtre introduit, au contraire, la charge et la vitesse dans le calcul.

5°. La théorie ordinaire n'a aucun moyen de calculer la vitesse que prendra la machine avec une résistance donnée.

La nôtre donne ce calcul avec la même simplicité que les précédens.

6°. La théorie ordinaire regarde le régulateur comme déterminant la pression dans le cylindre. Elle ne tient néanmoins aucun compte de ses variations dans le calcul.

La nôtre regarde le régulateur comme fixant la pression dans la chaudière, et non dans le cylindre. Elle introduit ses effets dans les formules.

7°. La théorie ordinaire n'est qu'une approximation plus ou moins exacte.

La nôtre, au contraire, comme on le verra bientôt développé, est une méthode complètement analytique dans toutes ses parties. Outre qu'elle permet, ainsi qu'on l'a dit plus haut, de calculer la vitesse d'une machine avec une charge fixée, on verra, dans le courant de cet ouvrage, qu'elle fait connaître la charge et la vitesse qui produisent dans les machines le maximum d'effet utile; qu'elle donne le moyen de calculer les machines atmosphériques, que Watt et Robison avaient déclarées échapper à l'investigation; qu'elle explique les effets des machines de Cornwall, qui s'accordaient si peu avec la théorie ordinaire, qu'ils étaient considérés comme impossibles par la plupart des ingénieurs; enfin, qu'elle permet de déterminer le contre-poids qui produit le maximum d'effet utile dans les machines à simple action, problème qui était resté insoluble dans la théorie ordinaire.

Rien n'est donc plus distinct que ces deux méthodes; et comme, non-seulement jusqu'en 1835, époque à laquelle nous avons posé d'abord ces principes dans notre *Traité des Locomotives*, en indiquant toute leur généralité, mais même jusqu'en 1837, où nous les avons développés devant l'*Académie des Sciences*, tous les auteurs qui ont traité ces questions, soit dans leurs écrits, soit dans leurs cours publics, ont employé la méthode des coefficiens, comme on a même soutenu alors que la théorie que nous proposions n'était admissible que pour les locomotives, mais nullement pour les autres machines à vapeur, nous croyons qu'il est suffisamment clair que ces questions étaient conçues d'une tout autre manière que nous ne le fesons.

Nous laisserons donc maintenant de côté la théorie ordinaire, et nous passerons au développement complet des formules, dont nous n'avons jusqu'ici donné qu'un aperçu général.

CHAPITRE II.

DES LOIS QUI RÈGLENT L'ACTION MÉCANIQUE DE LA VAPEUR ET DES APPAREILS EN USAGE POUR MESURER SA FORCE ÉLASTIQUE.

ARTICLE I.

DES LOIS QUI RÈGLENT L'ACTION MÉCANIQUE DE LA VAPEUR.

§ I. *Relation entre la température et la pression, dans la vapeur en contact avec le liquide.*

Avant d'entrer dans des considérations qui ont pour base les effets de la vapeur, il est nécessaire de préciser en peu de mots quelques-unes des lois d'après lesquelles se détermine ou se modifie l'action mécanique de la vapeur.

On a besoin, dans le calcul des machines, de considérer quatre choses dans la vapeur.

Sa *pression*, que l'on nomme aussi tension ou force élastique, et qui est la pression qu'elle exerce sur chaque unité de la surface du vase qui la contient. On distingue la pression *absolue* et la pression *effective*. La première est la tension réelle de la vapeur, ou l'effort total qu'elle exerce contre les corps soumis à son action ; la seconde est seulement l'excès de cette même force sur la pression atmosphérique, et ne se présente, par conséquent, que dans les machines à haute pression.

Sa *température*, qui est le nombre de degrés que marque un thermomètre plongé dans son milieu.

Sa *densité*, qui est le poids d'une unité de volume de cette vapeur.

Et son *volume spécifique*, qui est le volume d'un poids donné de vapeur comparé au volume d'un même poids d'eau, ou si l'on veut, au volume de l'eau qui a servi à sa production.

Nous ajoutons ici le mot *spécifique*, afin d'éviter toute confusion entre le volume absolu occupé par la vapeur, lequel dépend de la capacité du vase contenant, et

le volume spécifique qui est l'inverse de la densité. Ainsi, par exemple, si de la vapeur se forme sous la pression de l'atmosphère, elle pourra remplir un vase de grandeur quelconque, mais son volume spécifique sera toujours 1696 fois le volume de l'eau. D'autre part, si l'on compare entre eux les volumes absolus occupés par un même poids de deux vapeurs différentes, on reconnaîtra que cela revient à comparer les volumes spécifiques de ces deux vapeurs; en effet, les deux vapeurs comparées, ayant le même poids, se trouvent correspondre à un même volume d'eau génératrice, et, par conséquent, le rapport entre leurs volumes spécifiques est le même que le rapport entre leurs volumes absolus.

Pour être plus clair, si l'on exprime par S un volume donné d'eau, par V le volume absolu de vapeur qui en résulte sous une certaine pression p, et par V' le volume absolu de vapeur qui en résulte sous une autre pression p', il est évident qu'en exprimant par μ le volume spécifique de la vapeur sous la pression p, on aura

$$\mu = \frac{V}{S};$$

et, de même, en exprimant par μ', le volume spécifique de la vapeur sous la pression p', on aura

$$\mu' = \frac{V'}{S}.$$

Par conséquent, on en déduira

$$\frac{\mu}{\mu'} = \frac{V}{V'};$$

c'est-à-dire que le rapport entre les volumes absolus occupés par un même poids de deux vapeurs différentes n'est autre chose, comme nous l'avons dit, que le rapport entre les volumes spécifiques de ces deux vapeurs.

Ces définitions posées, la vapeur peut être considérée à l'instant même de sa formation dans la chaudière et encore en contact avec le liquide dont elle émane, ou bien séparée de ce même liquide.

Lorsque la vapeur, après avoir été formée dans une chaudière, continue d'être en contact avec son eau de génération, on observe que la même température correspond invariablement à la même pression, et réciproquement. Il est alors impossible d'augmenter sa température, sans qu'aussitôt sa pression et sa densité n'augmentent spontanément; et il est impossible également d'augmenter sa densité ou sa pression, à moins qu'on n'augmente en même temps sa température. Dans cet état,

la vapeur est donc au *maximum de densité et de pression pour sa température,* et l'on voit qu'il existe alors une liaison constante entre sa température et sa pression, ou entre sa température et sa densité.

Si l'on sépare au contraire la vapeur de son eau génératrice, et que l'on augmente la température, l'état de maximum de densité cessera, puisqu'il n'y aura point d'eau pour fournir le surplus de vapeur, ou l'accroissement de densité correspondant à l'accroissement de température. Ainsi, il n'y aura plus alors cette liaison invariable mentionnée plus haut, entre la température et la pression, et l'on pourra, par des moyens accessoires, augmenter ou diminuer l'une à son gré, sans que l'autre varie nécessairement d'une manière correspondante, comme cela a lieu dans le cas du maximum de densité.

Il est donc nécessaire de distinguer l'un de l'autre ces deux états de la vapeur.

Une des lois les plus importantes à connaître sur les propriétés de la vapeur, est celle qui sert à déterminer la force élastique de la vapeur en contact avec le liquide, quand on connait la température sous laquelle elle se forme; ou, réciproquement, à déterminer cette température, lorsque la force élastique est connue. Non-seulement cette recherche est d'une utilité directe, mais nous verrons plus loin qu'elle sert également à déterminer la densité ou le volume spécifique de la vapeur formée sous une pression donnée, et c'est une connaissance qui est indispensable pour le calcul des machines à vapeur.

On avait depuis longtemps entrepris des expériences à ce sujet, et elles étaient fort nombreuses pour les vapeurs formées sous des pressions moindres que celle de l'atmosphère : dans cette partie de l'échelle, on possédait les observations de Southern, Ure et Dalton. Quant aux températures élevées, on avait les expériences de Taylor et quelques autres; mais ces expériences ne s'étendaient en général qu'à des pressions de quatre ou cinq atmosphères, et si quelques-unes allaient jusqu'à huit atmosphères, c'était sans présenter une échelle complète dans l'intervalle. L'extrême difficulté de ces sortes de recherches, lorsque l'on veut avoir des résultats réellemens exacts, les dépenses considérables qu'elles entraînent et le danger auquel elles exposent dans les hautes pressions, avaient empêché jusque-là qu'on ne poussât les expériences plus loin. C'est à l'Académie des Sciences de l'Institut de France que l'on doit d'avoir complété nos connaissances à cet égard. Elle confia le soin de ces délicates expériences à deux savans illustres, MM. Arago et Dulong, qui y employèrent tout ce qu'une étude approfondie des lois de la physique peut suggérer de précautions pour éviter les causes ordinaires d'erreurs. La pression de la vapeur y fut mesurée par des colonnes effectives de mercure contenues dans des tubes de cristal qui formaient ensemble une hauteur de plus de 26 mètres ou 87 pieds anglais, et produisaient des pressions s'élevant jusqu'à vingt-quatre atmosphères. Les instrumens furent fabriqués exprès par les plus habiles constructeurs, et aucune

dépense nécessaire ne fut épargnée; aussi, le plus grand degré de confiance doit-il être attaché à leurs résultats (*).

En ajoutant ces expériences à celles de Southern, Dalton et Taylor, on est en possession d'une série d'observations très-rapprochées, comprenant des pressions depuis $\frac{1}{150}$ d'atmosphère jusqu'à vingt-quatre atmosphères, et des températures, depuis celle de la glace fondante, jusqu'à 224 degrés du thermomètre centigrade, ou 436.5 degrés de Fahrenheit.

Cependant, pour former une table suivie par intervalles donnés de pression ou de température, il fallait être en état de remplir, par interpolation, les intervalles qui subsistaient entre les observations originales. De même, pour pouvoir déterminer directement, dans tous les cas, soit la pression, soit la température de la vapeur dans des conditions données, il fallait une expression qui représentât d'une manière suffisamment exacte la loi des observations. Dans ce double but, donc, diverses formules ont été proposées, et nous allons les faire connaître successivement.

1°. Celle de Southern, que nous donnerons un peu plus loin, s'applique très-bien aux pressions moindres qu'une atmosphère : elle ne s'écarte alors que très-peu des observations; mais, au delà de ce point, elle cesse d'offrir la même exactitude. D'une à quatre atmosphères, elle donne plus d'erreur que celle de Tredgold modifiée, et, au delà de quatre atmosphères, elle est beaucoup moins exacte que celle de MM. Arago et Dulong, qui est d'ailleurs d'un calcul plus facile. Les erreurs qu'elle produit s'élèvent dans ce dernier cas jusqu'à 1.5 degré centigrade, ou 2.6 degrés du thermomètre de Fahrenheit; tandis que, dans les mêmes points, la formule de MM. Arago et Dulong ne s'écarte jamais des observations de plus de 0.4 degré centigrade, ou 0.7 degré de Fahrenheit.

2°. Pour les pressions comprises entre une et quatre atmosphères, une formule originairement proposée par Tredgold, et modifiée ensuite par M. Mellet, son traducteur, était celle qui donnait les résultats les plus exacts; et c'est pourquoi MM. Arago et Dulong en avaient, pour cet intervalle, adopté l'usage. On ne trouve effectivement aucun inconvénient à son emploi, quand il s'agit seulement de dresser une table par intervalles de demi-atmosphères. Mais comme, pour l'usage commode des formules que nous proposerons dans cet ouvrage, nous aurons besoin d'établir une table par intervalle de livre en livre, par pouce carré, ou de quinzième en quinzième, nous croyons devoir préférer une formule que nous donnerons un peu plus loin avec les autres, et qui, tout en s'approchant autant que celle de Tredgold des résultats de l'observation directe, dans les points fournis par l'expérience, a, de plus,

---

(*) *Voyez :* Exposé des recherches faites par ordre de l'Académie des Sciences, pour déterminer les forces élastiques de la vapeur d'eau, à de hautes températures. *Mémoires de l'Académie des Sciences*, tome X; *Annales de Chimie et de Physique*, tome XLIII, 1830.

l'avantage de retomber exactement, de quatre à quatre et demie atmosphères, dans la formule de MM. Dulong et Arago, qui doit en faire la continuation (*). Du reste, les résultats de la formule que nous proposons, étant rapprochés des expériences de Taylor et de celles de MM. Arago et Dulong, montrent qu'en l'employant pour l'intervalle compris entre une et quatre et demie atmosphères, on ne peut, en aucun cas, commettre une erreur plus grande que 0.4 degré du thermomètre centigrade, ou 0.7 du thermomètre de Fahrenheit.

3°. Enfin, pour les pressions supérieures à quatre et demie atmosphères, la formule que MM. Arago et Dulong ont déduite de leurs expériences représente les observations avec une exactitude remarquable. Dans tout l'intervalle compris entre quatre et vingt-quatre atmosphères, son plus grand écart sur la température est, comme nous l'avons dit, de 0.4 degré du thermomètre centigrade, ou 0.7 degré de Fahrenheit, et dans presque tous les autres cas, l'erreur ne s'élève qu'à 0.1 degré centigrade, ou 0.18 Fahrenheit; son accord avec l'expérience est tel, surtout dans la partie la plus élevée de l'échelle, qu'on a lieu de penser qu'en l'appliquant à des températures s'élevant jusqu'à cinquante atmosphères, on ne pourrait en aucun cas se tromper, sur la température, de plus de 1 degré du thermomètre centigrade ou 1.8 degré de Fahrenheit. Ainsi, en ajoutant ses résultats à ceux de leurs expériences directes, MM. Arago et Dulong ont pu dresser, pour la première fois, une table des températures de la vapeur jusqu'à cinquante atmosphères de pression, avec la certitude de ne commettre aucune erreur digne de considération.

On voit, d'après ce qui précède, que la formule de Southern représente très-bien les observations pour les pressions inférieures à une atmosphère, mais qu'au

(*) En comparant les deux formules avec les résultats de l'observation, on trouve, en effet, en mesures françaises, comme on pourra le vérifier plus loin :

FORCE ÉLASTIQUE de la vapeur en atmosphères.	TEMPÉRATURE observée.	TEMPÉRATURE donnée par la formule de Tredgold, modifiée par M. Mellet.	TEMPÉRATURE donnée PAR la formule proposée.	TEMPÉRATURE donnée par la formule de MM. Arago et Dulong.
1	100	99.96	100	»
2.14	123.7	123.54	123.54	»
2.8705	133.3	133.54	133.17	»
4	»	145.43	144.88	»
4.5735	149.7	150.39	149.79	149.77

On voit que la formule que nous proposons s'écarte des températures observées à peu près autant que celle de Tredgold modifiée; mais que, seulement, comme la différence avec l'observation est en *moins* au lieu d'être en *plus*, il en résulte sa coïncidence à $4\frac{1}{2}$ atmosphères, avec celle de MM. Arago et Dulong, ce qui est nécessaire pour l'établissement de la table.

delà de ce point elle cesse d'être exacte ; que la formule de Tredgold et celle que nous proposons à sa place conviennent au contraire aux pressions comprises entre une et quatre et demie atmosphères, mais qu'elles sont incorrectes en deçà et au delà de ces limites ; et enfin, que la formule de MM. Arago et Dulong est très-exacte dans l'intervalle compris entre quatre et cinquante atmosphères, mais que, pour les pressions moindres que quatre atmosphères, les deux formules précédentes lui sont préférables. Aucune de ces formules ne convient donc à la série totale de l'échelle des températures, et ce serait vouloir introduire sciemment des erreurs dans les tables, que de s'en tenir exclusivement à l'une quelconque d'entre elles. Comme d'ailleurs, la véritable loi théorique qui lie les pressions aux températures est inconnue, et que les formules dont nous parlons ne sont que des formules d'interpolation, uniquement établies par leur coïncidence avec les faits, le seul moyen d'en faire usage est d'appliquer respectivement chacune d'elles à la portion de la série à laquelle elle convient. Alors, d'après la comparaison de leurs résultats avec l'expérience, on peut être assuré qu'en aucun point l'erreur ne dépassera 7 dixièmes de degré sur la température de Fahrenheit, ou 4 dixièmes de degré sur celle du thermomètre centigrade. C'est le moyen suivi avant nous, et que nous avons de même adopté pour la formation des tables que nous présenterons dans un instant.

Les formules qui ont servi à la formation de ces tables sont donc les suivantes, que nous rapportons ici, non pas sous leur forme originale, mais transformées, pour plus de commodité, en mesures usuelles dans la pratique ; c'est-à-dire en y exprimant la pression p en livres anglaises par pouce carré, ou en kilogrammes par centimètre carré, et la température t en degrés du thermomètre *à mercure* de Fahrenheit, ou du thermomètre *à mercure* centigrade, comptés à l'ordinaire.

Formule de Southern, convenable aux pressions moindres que celle de l'atmosphère (mesures françaises) :

$$p = 0.0034542 + \left(\frac{46.278 + t}{145.360}\right)^{5.13},$$

$$t = 145.360 \sqrt[5.13]{p - 0.0034542} - 46.278.$$

Formule de Tredgold, modifiée par M. Mellet, convenable aux pressions de 1 à 4 atmosphères (mesures françaises) :

$$p = \left(\frac{75 + t}{174}\right)^{6},$$

$$t = 174 \sqrt[6]{p} - 75.$$

Formule convenable, ainsi que la précédente, aux pressions de 1 à 4 atmosphères, et proposée pour la remplacer (mesures françaises) :

$$p = \left(\frac{72.67 + t}{171.72}\right)^6,$$

$$t = 171.72 \sqrt[6]{p} - 72.67.$$

Formule de MM. Arago et Dulong, convenable aux pressions de 4 à 50 atmosphères (mesures françaises) :

$$p = (0.28658 + 0.0072003\, t)^5,$$

$$t = 138.883 \sqrt[5]{p} - 39.802.$$

Formule de Southern, convenable aux pressions moindres que celle de l'atmosphère (mesures anglaises) :

$$p = 0.04948 + \left(\frac{51.3 + t}{155.7256}\right)^{5.13},$$

$$t = 155.7256 \sqrt[5.13]{p - 0.04948} - 51.3.$$

Formule de Tredgold, modifiée par M. Mellet, convenable aux pressions de 1 à 4 atmosphères (mesures anglaises) :

$$p = \left(\frac{103 + t}{201.18}\right)^6,$$

$$t = 201.18 \sqrt[6]{p} - 103.$$

Formule convenable, ainsi que la précédente, aux pressions de 1 à 4 atmosphères, et proposée pour la remplacer (mesures anglaises) :

$$p = \left(\frac{98.806 + t}{198.562}\right)^6,$$

$$t = 198.562 \sqrt[6]{p} - 98.806.$$

Formule de MM. Arago et Dulong, convenable aux pressions de 4 à 50 atmosphères (mesures anglaises) :

$$p = (0.26793 + 0.0067585\, t)^5,$$

$$t = 147.961 \sqrt[5]{p} - 39.644.$$

Outre les formules que nous venons de rapporter, il en existe depuis longtemps une autre proposée par M. Biot, et qui, comparée par cet illustre physicien aux expériences de MM. Arago et Dulong sur les pressions élevées, à celles de Taylor sur les pressions plus rapprochées de 100 degrés, et à une nombreuse série d'observations inédites faites par M. Gay-Lussac, depuis 100 degrés jusqu'à — 20 degrés centigrades, reproduit les résultats observés avec des écarts accidentels très-petits, tels qu'en comportent les expériences elles-mêmes. Cette formule, qui a, par conséquent, sur les précédentes, l'avantage de s'appliquer à tous les points de l'échelle indistinctement, est la suivante :

$$\log p = a - a_1 b_1^{20+t} - a_2 b_2^{20+t}.$$

Log p est le logarithme tabulaire de la pression exprimée en millimètres de mercure à 0 degré ; t est la température centésimale comptée sur le thermomètre d'air, divisé d'après le coefficient de dilatation des gaz de M. Gay-Lussac, c'est-à-dire en appelant 1 degré de température chaque accroissement de 0.00375 du volume de l'air à 0 degré ; et les quantités a, a_1, a_2, b_1, b_2 sont des constantes qui ont les valeurs que voici :

$$\begin{aligned} a &= 5.96131\ 33025\ 9, \\ \log a_1 &= \bar{1}.82340\ 68819\ 3, \\ \log b_1 &= -\ 0.01309\ 73429\ 5, \\ \log a_2 &= 0.74110\ 95183\ 7, \\ \log b_2 &= -\ 0.00212\ 51058\ 3. \end{aligned}$$

Cette formule ne peut manquer d'être extrêmement utile dans un grand nombre de recherches délicates sur les effets de la vapeur d'eau; mais pour établir, par son moyen, une table de la forme qui nous est nécessaire, il faut d'abord en déduire la pression de degré en degré du thermomètre d'air centigrade, divisé d'après le coefficient de M. Gay-Lussac, puis changer ceux-ci en degrés du thermomètre à mercure; et comme alors on n'aura pas les degrés de température correspondans à des pressions données, par intervalles réguliers, il faudra chercher ensuite ceux-ci par une interpolation subséquente. Ces longueurs, qui sont évitées par les formules précédentes, puisqu'elles ne contiennent que les températures du thermomètre *à mercure* ordinaire et qu'elles présentent une solution immédiate, nous ont engagé à leur donner la préférence pour la construction des tables que nous présenterons plus loin.

Enfin, depuis la publication de la première édition de cet ouvrage, M. Lubbock a fait connaître une formule qui donne des résultats fort exacts dans une très-grande étendue de l'échelle des températures et ne s'écarte des observations que dans les températures très-basses. D'après la table publiée par cet auteur, pour toutes les pressions comprises entre 1 et 24 atmosphères, les températures

données par sa formule ne diffèrent au plus que de 0.3 degrés du thermomètre de Fahrenheit, ou 0.2 degré centigrade, de celles qu'on obtient par la combinaison de la formule que nous avons proposée avec celle de MM. Arago et Dulong; pour les pressions inférieures à 1 atmosphère, la formule de M. Lubbock est encore très-exacte jusqu'à $\frac{1}{7}$ d'atmosphère, mais, au dessous de ce point, elle commence à s'écarter de l'expérience, et, dans les pressions inférieures, elle donne des erreurs qui vont jusqu'à 1.43 et 1.83 degré de Fahrenheit sur des températures de 82 et 62 degrés. On ne peut donc la considérer comme exprimant la loi physique qui joint les pressions aux températures dans la vapeur en contact avec le liquide, mais on voit du moins qu'elle peut être très utile.

Cette formule est la suivante :

$$t = \frac{116.17316}{1.17602 - p^{0.0134}} - 448^\circ.$$

La pression p y est exprimée en atmosphères, et il serait bien facile de l'y réduire en livres par pouce carré, selon la mesure en usage; quant à la température t, c'est celle du thermomètre d'air de Fahrenheit divisé d'après le coefficient de dilatation des gaz de M. Gay-Lussac, c'est-à-dire en prenant pour 1 degré de température chaque augmentation de 0.0020833 du volume de l'air sec, à la température de 32 degrés Fahrenheit.

Cette formule est d'une forme très-simple, et nous avons vu qu'elle donne des résultats exacts dans des limites fort étendues; mais la nécessité de passer ensuite des degrés du thermomètre d'air divisé d'après le coefficient de M. Gay-Lussac à ceux du thermomètre à mercure, ce qui ne peut se faire que par une interpolation fatigante et incertaine, doit faire préférer, pour la construction des tables de correspondance entre la pression et la température de la vapeur en contact avec le liquide, l'usage successif des trois formules que nous avons rapportées plus haut.

§ II. *Relation entre les volumes spécifiques et les pressions, à température égale, ou entre les volumes spécifiques et les températures, à pression égale, dans les vapeurs séparées du liquide.*

Nous avons dit que, quand la vapeur est en contract avec le liquide producteur, sa pression est nécessairement liée à sa température; et, comme la densité d'un fluide élastique ne dépend que de sa température et de sa pression, il s'ensuit que cette densité est alors toujours constante, pour une température ou une pression données; mais lorsque la vapeur est séparée du liquide, cette liaison entre la température et la pression n'existe plus. On peut donc alors faire varier la température de la vapeur sans changer sa pression, ou réciproquement; et, selon

que l'on fait varier l'un ou l'autre de ces deux élémens, la densité de la vapeur éprouve des changemens qui ont été l'objet des recherches des physiciens.

Une loi très-remarquable dans les effets des gaz ou des vapeurs, est celle qui a été découverte par Mariotte, et confirmée depuis, jusqu'à des pressions de vingt-sept atmosphères, par MM. Arago et Dulong. Elle consiste en ce que, si l'on fait varier le volume d'un poids donné de gaz ou de vapeur, sans changer sa température, la force élastique de ce gaz variera en raison inverse du volume qu'on lui fait occuper, ou, si l'on veut, en raison directe de sa densité : c'est-à-dire que si V et V' expriment les volumes occupés par un même poids de vapeur, et p et p' les pressions qui maintiennent la vapeur comprimée sous ces volumes respectifs, la température étant en outre la même dans les deux cas, on aura la relation suivante :

$$\frac{p}{p'}=\frac{V'}{V}.$$

Et, par conséquent, en exprimant par μ et μ' les volumes spécifiques de la vapeur sous les pressions respectives p et p', on aura également, d'après ce qui a été dit dans le § 1er. de ce chapitre,

$$\frac{p}{p'}=\frac{\mu'}{\mu}.$$

D'après cette loi, si l'on comprime un poids donné d'un fluide élastique à moitié de son volume primitif, sans changer sa température, la force élastique de ce fluide deviendra double; mais il est clair que cet effet, pris isolément, ne peut avoir lieu dans les vapeurs en contact avec le liquide, parce qu'il suppose que, pendant le changement de pression, la température reste constante, et que nous avons vu, au contraire, que dans les vapeurs dont il est question, la pression change toujours avec la température, et réciproquement.

Une autre propriété, également importante pour apprécier les effets de la vapeur, a été découverte par un chimiste célèbre de nos jours, M. Gay-Lussac. Elle consiste en ce que, si l'on fait varier la température d'un poids donné d'un fluide élastique, gaz où vapeur, en maintenant sa tension au même degré, il éprouvera des augmentations de volume exactement proportionnelles aux augmentations de température.

En cherchant en outre à déterminer la quantité de cette dilatation des gaz ou des vapeurs par degré de température, M. Gay-Lussac avait trouvé que, pour chaque degré de température du thermomètre à mercure centigrade, compris entre 0 et 100 degrés, l'accroissement de volume était de 0.00375 du volume occupé par le même poids de fluide à la température zéro. D'autre part, d'après les expériences de Petit et Dulong, un thermomètre d'air sec établi sur cette donnée, c'est-à-dire dans lequel on marquerait un degré de température pour chaque accroissemeent de 0.00375 du volume de l'air à zéro, et que] l'on cor-

rigerait de la dilatation du verre, ne s'accorderait pas, au delà de 100 degrés, avec le thermomètre à mercure ordinaire : la différence entre eux irait toujours en croissant jusqu'au point d'ébullition du mercure, ou 360 degrés du thermomètre à mercure, qui se trouveraient correspondre à 350 degrés seulement du thermomètre d'air. On en avait donc conclu que l'accroissement de volume des gaz, par degré de température, n'était constant qu'autant qu'on le rapportait au thermomètre d'air corrigé de la dilatation du verre ; mais que la dilatation du mercure dans le verre était trop irrégulière pour que la même loi pût s'appliquer aux degrés de température mesurés sur le thermomètre à mercure, si ce n'est cependant pour des températures inférieures à 100 degrés. Ainsi, pour toute température plus élevée, il fallait d'abord la réduire en degrés du thermomètre d'air, et ensuite c'était à cette dernière température seulement qu'était applicable le coefficient de dilatation indiqué plus haut.

Mais, dans des expériences plus récentes, un physicien allemand, M. F. Rudberg, a trouvé que le coefficient de dilatation des gaz devait être réduit à 0.003646, et cette détermination a été confirmée depuis par les recherches de M Regnault. En outre, un thermomètre d'air qui serait gradué d'après cette donnée ne différerait du thermomètre à mercure, même dans les températures les plus élevées, que de quantités fort petites et tout-à-fait négligeables pour l'objet qui nous occupe. Nous devons donc admettre que, pour chaque degré du thermomètre *à mercure* centigrade, la dilatation des gaz et des vapeurs est sensiblement constante et exprimée par 0.00365 du volume occupé par le même poids du fluide à la température zéro ; et que, si l'on emploie le thermomètre *à mercure* de Fahrenheit, chaque augmentation de 1 degré dans la température produit un accroissement de volume de 0.00203 du volume occupé par le fluide à la température de 32 degrés (*)

Si donc, nous appelons V_0 le volume d'un poids donné de fluide élastique, sous une pression quelconque et à la température de 32 degrés de Fahrenheit, ou zéro du thermomètre centigrade, le volume que ce même poids de fluide occupera sous la même pression et à la température t prise au thermomètre à mercure, sera, en mesures anglaises :

$$V = V_0 + V_0 \times 0.00203\,(t - 32);$$

ou, en mesures françaises :

$$V = V_0 + V_0 \times 0.00365\,t.$$

Il s'ensuit qu'entre les volumes V et V', occupés par le même poids de vapeur

(*) Voyez *Annales de Physique et de Chimie* de J.-C. Poggendorff, tomes XLI, XLIII, XLIV ; et *Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, tome XII pages 653 et 766, pour une Note que nous avons communiquée à ce sujet.

à la même pression, et sous les températures respectives t et t', on a la relation, en mesures anglaises :

$$\frac{V}{V'} = \frac{1 + 0.00203\,(t - 32)}{1 + 0.00203\,(t' - 32)} = \frac{461.2 + t}{461.2 + t'};$$

ou, en mesures françaises :

$$\frac{V}{V'} = \frac{1 + 0.00365\,t}{1 + 0.00365\,t'} = \frac{274 + t}{274 + t'}.$$

Et puisque nous avons vu que le rapport entre les volumes occupés par le même poids de deux vapeurs différentes n'est autre chose que le rapport entre les volumes spécifiques de ces deux vapeurs, les deux relations précédentes seront également vraies en y remplaçant le rapport $\frac{V}{V'}$ des volumes absolus par le rapport $\frac{\mu}{\mu'}$ des volumes spécifiques.

Cette loi, supposant que la température de la vapeur change, sans que la pression subisse cependant aucun changement, ne peut évidemment convenir aux effets qui se produisent dans les vapeurs en contact avec le liquide, puisque dans celles-ci la pression change nécessairement et spontanément avec la température.

§ III. *Relation entre les volumes spécifiques, les pressions et les températures, dans les vapeurs en contact ou non avec le liquide.*

Ainsi qu'on vient de le dire, la loi de Mariotte, non plus que celle de Gay-Lussac, ne peuvent s'appliquer isolément aux changemens qui surviennent dans les vapeurs qui continuent de rester en contact avec le liquide; mais il est clair que, de leur ensemble, on peut déduire une troisième relation propre à déterminer les variations de volume qui ont lieu dans les vapeurs, en vertu d'un changement simultané dans la température et dans la pression; et cette relation pourra, dès lors, comprendre le cas des vapeurs en contact avec le liquide, puisqu'il suffira d'introduire dans la formule les pressions et températures qui, dans cet état de la vapeur, se correspondent entre elles.

Supposons donc qu'il s'agisse de connaître le volume occupé par un poids donné de vapeur, qui passe de la pression p' et de la température t', à la pression p et à la température t. On pourra supposer que la vapeur passe d'abord de la pression p' à la pression p sans altérer sa température, ce qui, d'après la loi de Mariotte, donnera entre les volumes spécifiques μ' et μ'' de la vapeur, avant et après cette transformation,

$$\mu'' = \mu' \frac{p'}{p};$$

puis ensuite on supposera que cette vapeur passe de la température t' à la température t, sans altérer sa pression, et le volume spécifique de la vapeur deviendra, d'après la loi de Gay-Lussac, en mesures anglaises :

$$\mu = \mu'' \frac{461.2 + t}{461.2 + t'} = \mu' \frac{p'}{p} \cdot \frac{461.2 + t}{461.2 + t'};$$

ou, en mesures françaises :

$$\mu = \mu'' \frac{274 + t}{274 + t'} = \mu' \frac{p'}{p} \cdot \frac{274 + t}{274 + t'}.$$

On aura évidemment, par ce moyen, la loi suivant laquelle le volume spécifique de la vapeur change, en vertu d'une combinaison donnée de pression et de température. Par conséquent, en ne mettant dans cette équation pour p et t, p', et t', que les pressions et températures qui se correspondent dans les vapeurs en contact avec le liquide, ou aura les changemens analogues qui se produisent dans le volume spécifique de la vapeur, lorsqu'on ne la sépare pas de son eau génératrice.

D'un autre côté, on sait, par les expériences de M. Gay-Lussac, que sous la pression atmosphérique ou 14.706 lbs par pouce carré, et à la température de 212 degrés Fahrenheit, ou en mesures françaises, sous la pression de 1.0335 kilogramme par centimètre carré, et à la température de 100 degrés du thermomètre centigrade, le volume spécifique de la vapeur d'eau en contact avec le liquide est 1696 fois celui de l'eau qui l'a produite. On peut donc facilement en conclure le volume du même poids de vapeur à une pression quelconque p et à la température t correspondante. Il suffira, pour cela, de mettre pour p', t' et μ' les valeurs ci-dessus, dans l'équation générale qu'on a obtenue plus haut, et l'on trouvera pour résultat :

En mesures anglaises :

$$\mu = 1696 \times \frac{14.706}{p} \times \frac{461.2 + t}{461.2 + 212} = 37.049 \frac{461.2 + t}{p},$$

qui donne également

$$p = 37.049 \frac{461.2 + t}{\mu};$$

ou, en mesures françaises :

$$\mu = 1696 \frac{1.0335}{p} \cdot \frac{274 + t}{274 + 100} = 4.6867 \frac{274 + t}{p},$$

qui donne de même :

$$p = 4.6867 \frac{274 + t}{\mu}.$$

Ainsi, nous pourrons, au moyen de ces relations, calculer le volume spécifique de la vapeur formée sous une pression donnée, ou réciproquement, dès que nous connaîtrons la température qui correspond à cette pression dans les vapeurs au maximum de densité.

En calculant donc, d'après les formules que nous avons données dans le § 1er de ce chapitre, la température de la vapeur au maximum de densité, sous les différentes pressions contenues dans la première colonne du tableau suivant, on formera d'abord la deuxième colonne du même tableau ; puis, en se servant de cette suite de températures pour les introduire dans la formule qui précède, on en conclura la troisième colonne, ou les volumes spécifiques de la vapeur formée sous toutes les pressions, depuis les plus basses jusqu'à huit atmosphères. Cette table dispensera, par conséquent, de tout le calcul, soit à l'égard de la recherche des températures, soit à l'égard de celle des volumes spécifiques ou des densités ; et son étendue suffira pour toutes les applications qui se présentent dans le travail des machines à vapeur. Il est entendu que, lorsque nous parlons de la vapeur *formée* sous une pression donnée, nous voulons dire que cette vapeur est prise au moment de sa formation, et, par conséquent, en contact avec le liquide.

TABLE *du volume de la vapeur, formée sous différentes pressions, comparé au volume de l'eau qui l'a produite (mesures françaises).*

PRESSION absolue, en kilogrammes par centimètre carré.	TEMPÉRATURE correspondante, en degrés du thermomètre centigrade.	VOLUME SPÉCIFIQUE, ou volume de la vapeur comparé au volume de l'eau qui l'a produite.	PRESSION absolue, en kilogrammes par centimètre carré.	TEMPÉRATURE correspondante, en degrés du thermomètre centigrade.	VOLUME SPÉCIFIQUE, ou volume de la vapeur comparé au volume de l'eau qui l'a produite.
0.1	45.9	14992	4.3	146.1	458
0.2	59.6	7817	4.4	147.0	448
0.3	68.4	5349	4.5	147.8	439
0.4	75.1	4090	4.6	148.7	430
0.5	80.5	3323	4.7	149.5	422
0.6	85.2	2806	4.8	150.3	414
0.7	89.2	2432	4.9	151.1	406
0.8	92.8	2149	5	151.8	399
0.9	94.4	1918	5.1	152.6	392
1	99.0	1748	5.2	153.3	385
1.1	101.8	1601	5.3	154.1	378
1.2	104.4	1477	5.4	154.8	371
1.3	106.7	1373	5.5	155.5	365
1.4	109.0	1282	5.6	156.2	359
1.5	111.1	1203	5.7	156.9	354
1.6	113.0	1133	5.8	157.6	348
1.7	114.9	1072	5.9	158.3	343
1.8	116.7	1017	6	158.9	338
1.9	118.4	967	6.1	159.6	333
2	120.1	923	6.2	160.3	328
2.1	121.7	882	6.3	160.9	323
2.2	123.2	845	6.4	161.5	318
2.3	124.6	811	6.5	162.1	314
2.4	126.1	780	6.6	162.8	310
2.5	127.4	752	6.7	163.4	306
2.6	128.7	726	6.8	164.0	302
2.7	130.0	701	6.9	164.6	298
2.8	131.2	678	7	165.2	294
2.9	132.4	657	7.1	165.7	290
3	133.6	637	7.2	166.3	287
3.1	134.6	618	7.3	166.9	283
3.2	135.8	600	7.4	167.5	280
3.3	136.9	583	7.5	168.0	277
3.4	137.9	568	7.6	168.6	273
3.5	138.9	553	7.7	169.1	270
3.6	139.9	539	7.8	169.7	267
3.7	140.9	525	7.9	170.2	264
3.8	141.8	513	8	170.7	261
3.9	142.8	501	8.5	173.3	247
4	143.7	489	9	175.7	234
4.1	144.6	478	9.5	178.1	223
4.2	145.3	468	10	180.3	212

TABLE ***du volume de la vapeur, formée sous différentes pressions, comparé au volume de l'eau qui l'a produite (mesures anglaises).***

PRESSION absolue, en livres anglaises par pouce carré.	TEMPÉRATURE correspondante, en degrés du thermomètre de Fahrenheit.	VOLUME SPÉCIFIQUE, ou volume de la vapeur comparé au volume de l'eau qui l'a produite.	PRESSION absolue, en livres anglaises par pouce carré.	TEMPÉRATURE correspondante, en degrés du thermomètre de Fahrenheit.	VOLUME SPÉCIFIQUE, ou volume de la vapeur comparé au volume de l'eau qui l'a produite.
1	102.9	20900	43	272.9	632
2	126.1	10880	44	274.3	619
3	141.0	7437	45	275.7	607
4	152.3	5682	46	277.1	595
5	161.4	4613	47	278.4	583
6	169.2	3893	48	279.7	572
7	176.0	3373	49	281.0	561
8	182.0	2979	50	282.3	551
9	187.4	2670	51	283.6	541
10	192.4	2422	52	284.8	531
11	197.0	2217	53	286.0	522
12	201.3	2045	54	287.2	513
13	205.3	1899	55	288.4	505
14	209.0	1773	56	289.6	497
15	213.0	1665	57	290.7	489
16	216.4	1569	58	291.9	481
17	219.6	1584	59	293.0	473
18	222.6	1407	60	294.1	466
19	225.6	1339	61	294.9	459
20	228.3	1277	62	295.9	452
21	231.0	1221	63	297.0	446
22	233.6	1170	64	298.1	440
23	236.1	1123	65	299.1	433
24	238.4	1080	66	300.1	427
25	240.7	1040	67	301.2	422
26	243.0	1003	68	302.2	416
27	245.1	969	69	303.2	410
28	247.2	937	70	304.2	405
29	249.2	907	71	305.1	400
30	251.2	880	72	306.1	395
31	253.1	853	73	307.1	390
32	255.0	829	74	308.0	385
33	256.8	806	75	308.9	380
34	258.6	784	76	309.9	376
35	260.3	764	77	310.8	371
36	262.0	744	78	311.7	367
37	263.7	726	79	312.6	363
38	265.3	708	80	313.5	359
39	266.9	692	81	314.3	355
40	268.4	676	82	315.2	351
41	269.9	661	83	311.6	348
42	271.4	646	84	316.9	344

TABLE *du volume de la vapeur, formée sous différentes pressions, comparé au volume de l'eau qui la produite (mesures anglaises).* — Suite.

PRESSION absolue, en livres anglaises par pouce carré.	TEMPÉRATURE correspondante, en degrés du thermomètre de Fahrenheit.	VOLUME SPÉCIFIQUE, ou volume de la vapeur comparé au volume de l'eau qui l'a produite.	PRESSION absolue, en livres anglaises par pouce carré.	TEMPÉRATURE correspondante, en degrés du thermomètre de Fahrenheit.	VOLUME SPÉCIFIQUE ou volume de la vapeur comparé au volume de l'eau qui l'a produite.
85	317.8	340	98	328.1	299
86	318.6	337	99	328.8	296
87	319.4	333	100	329.6	293
88	320.3	330	105	333.2	281
89	321.1	326	120	343.3	249
90	321.9	323	135	352.4	224
91	322.7	320	150	360.8	203
92	323.5	317	165	368.5	187
93	324.3	313	180	375.6	173
94	325.0	310	195	382.3	161
95	325.8	307	210	388.6	150
96	326.6	305	225	394.6	141
97	327.3	302	240	400.2	133

§ IV. *Relation directe entre les volumes spécifiques et les pressions, dans les vapeurs en contact avec le liquide.*

On vient de voir, d'après les formules données dans le paragraphe précédent, que la densité et le volume spécifique de la vapeur, séparée ou non du liquide, se déduisent de la connaissance simultanée de sa pression et de sa température. D'un autre côté, on sait que dans les vapeurs en contact avec le liquide, la température dépend immédiatement de la pression ; il doit donc être possible de trouver une relation propre à déterminer directement le volume spécifique de la vapeur en contact avec le liquide, ou, si l'on veut, de la vapeur au maximum de densité et de pression pour sa température, au moyen de la simple connaissance de la pression sous laquelle elle se forme.

L'équation qui donne le volume spécifique de la vapeur, dans un état quelconque, en fonction de sa pression et de sa température, a été donnée plus haut. Nous avons fait connaître de même les formules au moyen desquelles on détermine la température en fonction de la pression, dans les vapeurs en contact avec le liquide ; en éliminant donc la température entre l'équation des volumes et celle des températures, on obtiendra définitivement la relation cherchée, ou le volume spécifique de la vapeur au maximum de densité, en fonction de sa pression seulement.

Mais ici se présente la difficulté. D'abord la formule de M. Biot, ne pouvant se résoudre par rapport à la température, ne permet pas l'élimination nécessaire; ensuite, l'ensemble des trois formules rapportées plus haut, et que l'on fait succéder les unes aux autres, convient fort bien à la formation de tables de correspondance entre les pressions et les températures, quand c'est le but qu'on se propose. De même encore, quand il s'agit d'une recherche relative à la détente de la vapeur dans une machine, et qu'on sait exactement dans quelles limites de pression cette détente s'exercera, on peut discerner immédiatement laquelle des trois formules est applicable au cas que l'on a à considérer, et il est possible alors d'éliminer t entre cette formule et l'équation des volumes; mais s'il s'agit, par exemple, du cas où la vapeur, se formant dans la chaudière sous une pression de 8 ou 10 atmosphères, pourrait, selon les circonstances du mouvement, se détendre pendant son action dans la machine, tantôt à une pression moindre que 1 atmosphère, tantôt à une pression comprise entre 1 et 4 atmosphères, tantôt enfin à une pression supérieure à 4 atmosphères, alors on ne saura plus laquelle des trois formules devra servir à l'élimination, et il sera impossible d'arriver à une équation générale représentant, dans tous les cas, l'effet de la machine.

D'ailleurs, quand on adopterait l'une quelconque de ces formules, les fonctions exponentielles qu'elles contiennent introduiraient encore dans les calculs une complication qui ne saurait convenir aux applications pratiques; et c'est ce qui arrive pour la formule de M. Lubbock, dont la forme se prêterait d'ailleurs à l'élimination nécessaire.

Les équations de température connues jusqu'à présent ne peuvent donc résoudre d'une manière satisfesante la question qui s'offre ici, c'est-à-dire remplir les besoins du calcul des machines à cet égard; et, par conséquent, ce qu'il y a de mieux à faire est de chercher directement une relation approximative, propre à donner immédiatement le volume spécifique de la vapeur au maximum de densité, en fonction de sa pression seulement.

Dans ce but, M. Navier avait proposé l'expression

$$\mu = \frac{1000}{0.09 + 0.0000484p},$$

dans laquelle μ est le rapport du volume de la vapeur à celui occupé par un même poids d'eau, et p la pression exprimée en kilogrammes par mètre carré; mais cette formule, assez exacte pour les hautes pressions, s'écarte considérablement de l'expérience pour les pressions inférieures à la pression atmosphérique, qui sont cependant utiles pour les machines à condensation. En outre, dans les machines sans condensation, et par conséquent à haute pression, il est possible d'en trouver une beaucoup plus exacte, comme on va le voir. Nous croyons donc devoir proposer, pour cet objet, les formules suivantes, qui sont les mêmes que nous avons présentées dans la première édition de cet ouvrage, mais que nous mettons maintenant sous une forme plus commode pour le calcul.

Formule pour les machines de divers systèmes, *à condensation:*

$$\mu = \frac{20.000,000}{1200 + p}, \text{ en mesures françaises ;}$$

$$\mu = \frac{4.100,000}{250 + p}, \text{ en mesures anglaises.}$$

Formule pour les machines de divers systèmes, *sans condensation :*

$$\mu = \frac{21,232,000}{3020 + p}, \text{ en mesures françaises ;}$$

$$\mu = \frac{4,348,000}{620 + p}, \text{ en mesures anglaises.}$$

Dans ces formules, la pression p est exprimée en kilogrammes par mètre carré, ou en livres anglaises par pied carré, selon les mesures employées.

Pour plus de simplicité, nous représenterons d'une manière générale ces formules par l'expression

$$\mu = \frac{m}{n + p}, \quad (a)$$

dans laquelle les constantes m et n auront, selon les machines considérées, les valeurs respectives indiquées plus haut, savoir :

Machines à condensation.

$m = 20,000,000$, $n = 1200$, en mesures françaises ;
$m = 4,100,000$, $n = 250$, en mesures anglaises.

Machines sans condensation.

$m = 21,232,000$, $n = 3020$, en mesures françaises;
$m = 4,348,000$, $n = 620$, en mesures anglaises.

La première des deux formules proposées convient également aux pressions supérieures et inférieures à celle de l'atmosphère, du moins dans les limites qu'on a besoin de considérer généralement pour les applications des machines à vapeur. En effet, en consultant la table de comparaison que nous allons présenter dans un instant, on verra qu'elle donne les volumes exacts pour les pressions de 10 et 50 livres par pouce carré, ou $\frac{2}{3}$ et 3 et demie atmosphères, qui sont les pressions moyennes les plus ordinaires après et avant la détente ; que pour toutes les pressions comprises entre 7.5 et 75 livres par pouce carré, c'est-à-dire, entre $\frac{1}{2}$ et 5 atmosphères, l'erreur ne surpasse jamais $\frac{1}{40}$ du volume réel de la vapeur, et, enfin, qu'entre 6 et 120 livres de pression, l'erreur maximum ne s'élève qu'à $\frac{1}{20}$ à-peu-près. Or, on

sait que la plus grande pression en usage dans les machines à condensation ne surpasse pas 5 et demie atmosphères, ou 80 livres par pouce carré ; et, d'un autre côté, d'après les *tracés d'indicateur* relevés sur ces machines, on sait aussi que la pression de la vapeur, pendant son action *motrice* dans le cylindre, ne descend jamais au-dessous de 6 livres par pouce carré, ou entre $\frac{1}{3}$ et $\frac{1}{2}$ atmosphère. Une formule qui donne les volumes de la vapeur, à $\frac{1}{40}$ près, pour tous les cas compris entre ces limites, à l'exception seulement des pressions inférieures à $\frac{1}{2}$ atmosphère, où l'erreur ne s'élève encore qu'à $\frac{1}{20}$, est donc tout ce qui est nécessaire pour calculer les effets produits.

Cette première formule pourrait encore être employée sans erreur notable pour les machines sans condensation ; mais, comme dans celles-ci, la pression de la vapeur dans le cylindre ne descend presque jamais au-dessous de 1 $\frac{1}{2}$ atmosphère, il est inutile de demander à la formule des volumes exacts au-dessous de cette limite. Pour ce cas donc, on trouvera plus avantageux de recourir à la seconde des formules proposées, car elle coïncide avec les volumes réels à 30 et 75 livres de pression par pouce carré, c'est-à-dire, à 2 et 5 atmosphères ; et, entre 1 $\frac{2}{3}$ et 10 atmosphères, l'erreur qu'elle produit n'excède jamais $\frac{1}{40}$ du volume réel, et se trouve presque toujours beaucoup plus petite.

On remarquera, du reste, qu'outre la nécesssité de ces formules pour le calcul général de l'effet des machines à vapeur, elles ont encore l'avantage, pour les autres besoins des arts, de dispenser entièrement des tables de température, et de suppléer aux tables des volumes de la vapeur, lorsqu'on n'a pas celles-ci près de soi.

Enfin, pour qu'on puisse se faire une idée précise de l'approximation que donnent les deux formules dont nous venons de parler, nous joignons ici une table des valeurs qu'elles fournissent pour les principaux points de l'échelle des pressions.

VOLUME *spécifique de la vapeur formée sous différentes pressions, calculé par les formules proposées.*

MESURES FRANÇAISES.				MESURES ANGLAISES.			
PRESSION absolue de la vapeur, en kilogmes. par centimètre carré.	VOLUME spécifique de la vapeur, calculé par les formules ordinaires.	VOLUME spécifique calculé par la formule proposée pour les machines à condensation.	VOLUME spécifique calculé par la formule proposée pour les machines sans condensation.	PRESSION absolue de la vapeur, en livres par pouce carré.	VOLUME spécifique de la vapeur, calculé par les formules ordinaires.	VOLUME spécifique calculé par la formule proposée pour les machines à condensation.	VOLUME spécifique calculé par la formule proposée pour les machines sans condensation.
0.1	14992	»	»	5	4613	4227	»
0.2	7817	»	»	6	3893	3680	»
0.3	5349	4762	»	7	3373	3259	»
0.4	4090	3846	»	8	2979	2924	»
0.5	3323	3226	»	9	2670	2652	»
0.6	2806	2778	»	10	2422	2426	»
0.7	2432	2439	»	11	2217	2236	»
0.8	2149	2174	»	12	2045	2073	»
0.9	1918	1961	»	13	1899	1932	»
1	1748	1786	1631	14	1773	1809	»
1.5	1203	1235	1178	15	1665	1701	1564
2	923	943	922	20	1277	1310	1242
2.5	752	763	758	25	1040	1065	1030
3	637	641	643	30	880	897	880
3.5	553	552	558	35	764	775	768
4	489	485	494	40	676	682	682
4.5	439	433	442	45	607	609	615
5	399	391	400	50	551	550	556
5.5	365	356	366	55	505	502	509
6	338	327	337	60	466	461	470
6.5	314	302	312	65	433	427	436
7	294	281	291	70	405	397	406
7.5	277	262	272	75	380	371	381
8	261	246	256	80	359	348	358
8.5	247	232	241	85	340	328	338
9	234	219	228	90	323	310	320
9.5	223	208	217	105	281	267	276
10	213	198	206	120	249	234	243
				135	224	208	217
				150	203	188	196

§ V. *De la chaleur constitutive de la vapeur en contact avec le liquide.*

Il est encore, relativement aux propriétés de la vapeur, une recherche qui a fixé depuis longtemps l'attention des physiciens: c'est celle de la quantité de chaleur nécessaire pour constituer la vapeur à l'état de fluide élastique sous divers degrés de tension.

On sait que lorsqu'on fait vaporiser de l'eau sous la pression atmosphérique, en vain lui ajoute-t-on continuellement de nouvelles quantités de chaleur au moyen du foyer, jamais la température de l'eau, non plus que celle de la vapeur, ne s'élèvent au delà de 100 degrés du thermomètre centigrade, ou 212 degrés du thermomètre de Fahrenheit. Il faut donc que toute la chaleur que l'on ajoute sans cesse au liquide passe dans la vapeur, mais s'y maintienne dans un état *latent*, puisque cette chaleur, quoique matériellement transmise par le foyer, reste néanmoins insensible au thermomètre, et qu'elle ne se manifeste ensuite qu'en se dégageant au moment où l'on condense la vapeur.

Cette chaleur latente est évidemment employée à maintenir les molécules d'eau dans l'écartement convenable à leur nouvel état de fluide élastique. Elle est alors absorbée par la vapeur d'une manière semblable à celle qui a été absorbée par l'eau en passant de l'état solide, c'est-à-dire de l'état de glace, à l'état liquide; mais il est important d'en connaître la quantité, pour apprécier avec exactitude les modifications que peut subir la vapeur.

Quelques essais entrepris par Watt avaient déjà fait pressentir que la vapeur, au moment de sa formation ou en contact avec le liquide, contient la même quantité de chaleur totale, à quelque degré de tension, ou si l'on veut, à quelque degré de densité qu'elle soit formée; mais les expériences de MM. Sharpe (de Manchester), Clément et Desormes, sont venues depuis confirmer ce résultat. On en déduit que la quantité de chaleur contenue à l'état latent, dans la vapeur en contact avec le liquide, est de moins en moins grande, à mesure que sa température est plus élevée, ce qui s'explique par l'augmentation de sa densité; de sorte que la chaleur *totale*, ou la somme de la chaleur latente, plus la chaleur indiquée par le thermomètre, forment dans tous les cas une quantité constante, représentée par 650 degrés du thermomètre centigrade, ou 1170 degrés de celui de Fahrenheit.

Southern, au contraire, a conclu de quelques expériences sur la pression et la température de la vapeur, que ce serait la portion latente de la chaleur qui serait constante, et que pour avoir la quantité totale de chaleur actuellement contenue dans la vapeur formée à une température donnée, il faudrait, à cette température, ajouter un nombre constant, qui représenterait la chaleur latente absorbée par la vapeur dans le changement d'état. Mais cette opinion n'a été confirmée, depuis, par aucune observation nouvelle, tandis que, outre les expériences citées plus haut, plusieurs faits, et

entre autres la consommation d'une même quantité de combustible pour vaporiser le même poids d'eau sous divers degrés de pression, sont venues vérifier la loi de Watt.

La quantité *totale* de chaleur contenue dans la vapeur en contact avec le liquide, et sous une pression quelconque, est donc une quantité constante ; et à mesure que la chaleur sensible augmente, la chaleur latente diminue au contraire d'une quantité égale. Mais on remarquera que cette loi n'est applicable qu'à la vapeur en contact avec le liquide.

D'un autre côté, d'après cette même loi, si l'on conçoit de l'eau renfermée dans un vase capable d'une résistance suffisante, et que l'on soumette cette eau à des températures de plus en plus élevées, la chaleur latente de la vapeur qui s'en élèvera, sera toujours de plus en plus petite, à mesure que la température de formation sera plus considérable; et lorsque la vapeur se produira à une température égale à 650 degrés centigrades ou 1170 degrés de Fahrenheit, elle cessera d'absorber de la chaleur à l'état latent, et n'en recevra plus aucune portion qui ne devienne sensible au thermomètre. Nous devons donc conclure qu'à ce point la vapeur aura une densité égale à celle de l'eau, puisqu'en passant d'un état à l'autre, elle n'exigera plus de nouvelle dose de chaleur, comme cela serait nécessaire s'il devait y avoir augmentation d'écartement entre les molécules. Ainsi l'eau, quoique toujours contenue dans le vase, y sera néanmoins passée en totalité, à l'état de vapeur, de sorte qu'il n'y aura plus de liquide en contact avec la vapeur, et la loi précédente cessera d'exister. Dès ce moment donc, on pourra ajouter au vase de nouvelles quantités de calorique ; mais, au lieu d'agir sur un liquide, on n'agira plus que sur un fluide élastique, et ainsi tous les accroissemens de chaleur qu'on lui fera subir deviendront, comme dans tous les gaz, sensibles au thermomètre.

Cette observation explique la difficulté qui sans cela se présenterait, en ce qu'au delà de 650 degrés centigrades ou de 1170 degrés de Fahrenheit, la loi précédente ne pourrait subsister qu'autant que la chaleur latente deviendrait une quantité négative, ce qui est impossible.

Il est encore un autre point qui exige ici quelques éclaircissemens. Nous avons dit que la vapeur en contact avec le liquide, sous tous les degrés de tension, contient toujours la même quantité de chaleur totale; il suit évidemment de là que, pour vaporiser un poids donné d'eau sous une pression quelconque, il faut toujours lui communiquer la même quantité de chaleur ou consommer la même quantité de combustible sous la même chaudière, et c'est effectivement ce qui se trouve confirmé par l'expérience. Comment se fait-il donc que la vapeur puisse se former à des degrés de pression plus ou moins considérables ? C'est ce qu'il est nécessaire d'examiner.

Supposons une chaudière remplie d'eau jusqu'à un certain niveau, et contenant, au-dessus de ce niveau et jusqu'au dôme supérieur, un espace libre de 17000 pouces cubes, susceptible d'être occupé par la vapeur; supposons, en outre, que cette chau-

dière soit placée au-dessus d'un foyer rempli de charbon allumé et capable de dégager une certaine quantité de chaleur par minute. Dès que le feu aura transformé en vapeur 10 pouces cubes de l'eau contenue dans la chaudière, la vapeur ainsi formée occupera l'espace libre dont nous avons parlé; et, puisque nous avons supposé que sa capacité est de 17000 pouces cubes ou 1700 fois le volume de l'eau vaporisée, il s'ensuit que la vapeur répandue dans cet espace y aura un volume spécifique égal à 1700 fois le volume de l'eau. Or, en recourant à la table que nous avons donnée plus haut, on verra que, lorsque le volume spécifique de la vapeur est exprimé par le nombre 1700, sa pression absolue est de 14.7 livres par pouce carré, et sa température sensible de 212 degrés de Fahrenheit; ainsi, dans ce moment, la vapeur contenue dans la chaudière sera à la pression de 14.7 livres par pouce carré. Si donc on suppose que la soupape de sûreté ne soit chargée que de la pression atmosphérique, qui est aussi de 14.7 livres par pouce carré, on voit que, si la soupape est assez large, la pression dans la chaudière ne pourra jamais s'élever au delà de ce point, parce que la vapeur s'échappera à mesure de sa production; et, par conséquent, quelle que soit l'intensité du feu, c'est-à-dire en quelque quantité que la vapeur soit produite, elle continuera toujours de se trouver dans la chaudière à la pression de 14.7 livres par pouce carré, et à la température correspondante, ou 212 degrés de Fahrenheit.

Mais, si nous supposons que la soupape de sûreté de la chaudière soit chargée de 50 livres par pouce carré, outre la pression atmosphérique, voici alors ce qui arrivera. Au moment où il n'y aura que 10 pouces cubes d'eau vaporisés, la vapeur remplira, comme nous l'avons dit, l'espace libre de la chaudière, et elle s'y trouvera, comme auparavant, à la pression de 14.7 livres par pouce carré, et à la température sensible de 212 degrés; mais, à mesure que le feu continuera son action, comme la vapeur ne peut plus s'échapper à mesure de sa production, à cause de la résistance de la soupape, l'eau vaporisée s'amassera dans la chaudière. Lors donc qu'il y aura 20 pouces cubes d'eau vaporisés, comme ces 20 pouces occuperont toujours un espace de 17000 pouces cubes, on voit que le volume de la vapeur comparé à celui de l'eau de production, c'est-à-dire le volume spécifique de la vapeur, sera exprimé par 850; donc, d'après la même table mentionnée précédemment, la vapeur résultant de la vaporisation de ces 20 pouces cubes se trouvera dans la chaudière à la pression absolue de 31 livres par pouce carré, et à la température sensible de 253 degrés, qui correspond à cette pression. Comme cependant cette pression de 31 livres par pouce carré ne sera pas encore suffisante pour soulever la soupape et permettre l'échappement de la vapeur à mesure de sa formation, la vapeur produite par l'action du feu continuera de s'amasser dans la chaudière. Lorsqu'il y aura 30 pouces cubes d'eau vaporisés, la pression dans la chaudière sera 48 livres par pouce carré, et la température 280 degrés; et enfin, lorsqu'il y aura 40 pouces cubes d'eau transformés en

vapeur, la pression sera devenue 65 livres par pouce carré, et la température 299 degrés de Fahrenheit. Mais, en ce moment, la pression de la vapeur sera devenue égale au poids de la soupape, et, par conséquent, celle-ci sera soulevée ; donc, à compter de ce point, la pression et la température de la vapeur continueront de se maintenir au même degré, quelle que soit d'ailleurs la vaporisation produite.

Actuellement, si l'on suppose que le feu conserve, dans tous les cas, une intensité constante, capable de communiquer par seconde, à un pouce cube d'eau froide, une quantité de chaleur exprimée par 1170 degrés de Fahrenheit, ou 650 degrés centigrades, on voit que la chaudière se trouvera en état de changer, à chaque seconde, un pouce cube d'eau en vapeur, et que ce pouce cube prendra, suivant le poids de la soupape de sûreté, la pression permanente de 15 livres, ou de 31 livres, ou de 48 livres, ou enfin de 65 livres par pouce carré; et chacun de ces effets se produira sans qu'il soit nécessaire de supposer que le feu ait plus d'intensité, c'est-à-dire sans qu'il se consomme plus de combustible dans un cas que dans l'autre.

§ VI. *De la conservation du maximum de densité de la vapeur, pendant son action dans les machines.*

Lorsqu'une machine est en action, la vapeur se produit dans la chaudière à une certaine pression; de là elle passe dans le cylindre en prenant une pression différente, et ensuite, si la machine est à détente, la vapeur, après sa séparation de celle de la chaudière, continue à se dilater de plus en plus dans le cylindre, jusqu'à la fin de la course du piston. On suppose ordinairement que, pendant tous les changemens de pression que subit ainsi la vapeur, sa température se conserve la même, et l'on conclut en conséquence que, durant son action dans la machine, sa densité et son volume spécifique suivent la loi de Boyle ou de Mariotte, c'est à-dire que le volume spécifique varie en raison inverse de la pression. Cette supposition simplifie considérablement les formules; mais, comme nous allons voir qu'elle est contraire à l'expérience, il est nécessaire que nous recherchions quelle est la loi suivant laquelle la vapeur change de température en même temps qu'elle change de pression dans la machine; et, comme les calculs relatifs aux effets de la vapeur dépendent essentiellement du volume qu'elle occupe, il faut que nous recherchions ensuite quels changemens ce volume éprouve en raison des variations simultanées de température et de pression qui se produisent dans la vapeur pendant son action. Nous remplacerons ainsi la relation précédemment indiquée, d'après la loi de Mariotte, par une autre plus réelle, déduite des faits eux-mêmes, et qui nous conduira à calculer avec plus d'exactitude les effets de la vapeur.

Nous venons de dire que, dans les calculs relatifs aux machines, on suppose

que la vapeur conserve invariablement sa température de formation, ce qui permet d'appliquer la loi de Mariotte à tous les changemens de densité ou de pression qu'elle subit. Cependant, comme on sait que les fluides élastiques ne se dilatent jamais sans éprouver un refroidissement, il est clair que la supposition dont il s'agit ne pourrait se réaliser qu'autant que la vapeur aurait le temps de recouvrer sur les corps avec lesquels elle est en contact, supposés suffisamment échauffés, la quantité de calorique nécessaire pour ramener sa température, après la dilatation, au même point où elle était auparavant. Or, la rapidité du mouvement de la vapeur dans les cylindres et les conduits des machines à vapeur ordinaires, et la température naturelle de ces conduits, qui fait qu'ils sont plutôt exposés à enlever du calorique à la vapeur qu'à lui en fournir, ne permettent pas d'admettre une semblable hypothèse.

Pour nous en assurer, pendant une série nombreuse d'expériences détaillée dans la deuxième édition de notre *Traité des locomotives* (chap. II, § VI, et chap. VII, § II), nous avons adapté à la chaudière d'une locomotive un thermomètre et un manomètre à air; puis nous avons appliqué deux instrumens semblables au conduit par lequel la vapeur, après avoir terminé son action dans la machine, s'échappait dans l'atmosphère, et nous avons observé leurs indications simultanées. La vapeur se formait dans la chaudière à une pression absolue qui variait de 40 à 65 livres par pouce carré, ou de 2. 7 à 4. 4 atmosphères, et elle s'échappait vers l'atmosphère à une pression absolue, qui variait, suivant différentes circonstances, de 20 à 15 livres par pouce carré, ou de 1.40 à 1.03 atmosphère. Si la vapeur avait conservé sa température pendant son action dans la machine, elle serait sortie avec la pression de 15 livres par pouce carré, par exemple, mais avec la température propre à la pression de 65 livres par pouce carré, à laquelle elle s'était formée. Or, il n'en était rien: pendant plusieurs centaines d'expériences, où nous avons observé et enregistré ces effets, nous avons trouvé invariablement que la vapeur sortait exactement avec la température qui convenait à sa pression actuelle; de sorte que le thermomètre, qui portait les divisions pour indiquer la pression dans les vapeurs au maximum de densité, donnait indentiquement le même degré de pression que le manomètre à air, et qu'il s'accordait également avec un petit manomètre à siphon, que nous avions encore ajouté à l'appareil au point de sortie de la vapeur. La vapeur se formait donc dans la chaudière à une pression très-élevée, et elle sortait de la machine avec une pression très-faible; mais, à sa sortie, aussi bien qu'à l'instant de sa production, cette vapeur était à la température qu'elle aurait eue, si elle s'était immédiatement formée à sa pression actuelle.

Ainsi, on voit que la vapeur ne conservait nullement sa température pendant son action, mais qu'après s'être formée dans la chaudière à une haute température et sous une haute pression, elle baissait ensuite plus ou moins de pression dans la machine, et que sa température baissait alors spontanément en même temps, de telle sorte que la vapeur restait toujours au maximum de pression ou de densité pour sa température.

Dans la machine soumise à l'expérience, la vapeur se trouvait, pendant toute son action, parfaitement protégée contre tout refroidissement extérieur; car le tuyau qui la conduisait de la chaudière au cylindre était d'abord plongé dans la vapeur même de la chaudière, jusqu'au point où il pénétrait dans le compartiment de la cheminée; ensuite, tant dans l'intervalle qui sépare ce point de l'entrée du cylindre, que pendant son action dans le cylindre lui-même, et depuis sa sortie du cylindre jusqu'à l'orifice de la tuyère, la vapeur se trouvait continuellement parcourir des espaces entièrement enclos dans le compartiment de la cheminée, et par conséquent en contact immédiat avec la flamme et les gaz chauds provenant du foyer. Cette vapeur ne pouvait donc éprouver aucun refroidissement dans son parcours.

Ainsi les expériences mentionnées plus haut se rapportaient à une machine entièrement mise à l'abri de tout refroidissement extérieur. D'un autre côté, si l'on suppose une machine où ces refroidissemens extérieurs ne soient pas également prévenus, leur effet sera d'abord d'opérer la condensation d'une partie de la vapeur produite, et, par conséquent, il existera dans les passages parcourus par la vapeur une certaine quantité d'eau à l'état liquide. Il en sera exactement de même dans le cylindre d'une machine à condensation, après la condensation imparfaite de la vapeur. Dans chacune de ces circonstances, la vapeur restante se trouvera matériellement en présence du liquide; donc elle sera nécessairement encore au maximum de densité pour sa température.

Mais il y a un autre cas qui peut également se présenter, c'est celui où la vapeur se trouvera soumise à un réchauffement pendant son action dans le cylindre. Dans ce cas, tant que la vapeur contiendra, mélangée avec elle, une certaine quantité d'eau à l'état liquide, ainsi que cela a toujours lieu au moment de la formation de la vapeur, il est clair que tout se passera encore comme dans le cas précédent car le réchauffement du cylindre ne fera que diminuer cette eau, en la vaporisant et, tant qu'il en restera une quantité quelconque, la vapeur se trouvera, comme précédemment, en présence du liquide; mais, si la température du cylindre est portée à un degré très-considérable, il pourra arriver que l'eau en suspension dans la vapeur soit d'abord vaporisée, et que la vapeur résultante subisse elle-même un réchauffement par suite de son contact avec une surface très-chaude. Ce cas est tout-à-fait exceptionnel dans les machines à vapeur, parce qu'il y en a très-peu où le cylindre soit exposé à un réchauffement extérieur, et où ce réchauffement soit suffisant pour faire disparaître toute l'eau liquide entraînée dans le cylindre, et pour augmenter ensuite notablement la température de la vapeur ainsi formée. Ce n'est que dans les machines de Cornwall qu'un tel concours de circonstances peut se rencontrer : c'est pourquoi nous n'en parlerons qu'en traitant de ces machines; mais, pour montrer d'une manière générale le moyen de tenir compte de cette circonstance, quand elle se présente, il convient de séparer les deux cas que nous venons de mentionner.

Dans le premier cas, c'est-à-dire, dans le cas général, on voit que la vapeur reste toujours, pendant son action dans le cylindre, à l'état de vapeur au maximum de densité pour sa température, comme si elle n'avait jamais cessé d'être en contact avec le liquide générateur.

Or, nous avons montré, dans le § IV de ce chapitre, qu'on peut, pour les vapeurs en contact avec le liquide, exprimer leur volume spécifique, en fonction de leur pression, par une formule très-simple que nous avons représentée en général sous la forme

$$\mu = \frac{m}{n+p}. \qquad (a)$$

Cette relation, dans laquelle n et p auront, suivant le cas, les valeurs numériques données plus haut, § IV, sera donc applicable à tous les changemens de volume de la vapeur dans les machines.

D'après cette équation, si l'on suppose qu'un certain volume d'eau représenté par S soit transformé en vapeur à la pression p, et que l'on appelle M le volume *absolu* de la vapeur qui en résulte, on aura

$$\frac{M}{S} = \mu = \frac{m}{n+p};$$

si ensuite, le même volume d'eau se transforme en vapeur à la pression p', et que l'on appelle M' le volume *absolu* qu'occupera la vapeur résultante, on aura encore

$$\frac{M'}{S} = \frac{m}{n+p'}.$$

Donc, enfin, entre les volumes absolus de vapeur qui correspondent au même poids d'eau, on aura la relation définitive

$$M = M'\frac{n+p'}{n+p}; \qquad (b)$$

c'est-à-dire, que les volumes de la vapeur seront entre eux, non pas dans le rapport inverse des pressions, comme on le supposait en admettant la loi de Mariotte ou de Boyle, mais dans le rapport inverse des pressions augmentées d'une constante.

On tire également de l'équation (b) la relation

$$p = \frac{M'}{M}(n+p') - n, \qquad (c)$$

et les deux équations (b) et (c) serviront à déterminer soit M, soit p, selon celle de ces deux quantités qui se trouvera inconnue.

Nous venons de voir que dans le cas général, c'est-à-dire quand le cylindre ne subit

aucun réchauffement extérieur, le volume et la pression de la vapeur, pendant son action dans la machine, se déterminent au moyen des équations (*a*), (*b*), (*c*); mais si, au contraire, il arrive, comme nous l'avons supposé plus haut, que la vapeur, après sa séparation de la chaudière, soit maintenue par des moyens factices à une certaine température constante t_1, il s'ensuivra que, pendant son action, cette vapeur changera de volume et de pression, mais sans changer de température; donc alors elle suivra la loi de Mariotte.

Mais, si la vapeur suit la loi de Mariotte, on voit qu'en exprimant par μ_1 le volume spécifique de la vapeur qui se formerait directement à la température donnée t_1, et par p_1 sa pression dans le même instant, ce que les tables du volume de la vapeur permettent de connaître facilement, on aura pour le volume occupé par le même poids de vapeur, sous une pression quelconque, mais à la même température,

$$\mu = \mu_1 \frac{p_1}{p},$$

et pour la pression de la même vapeur à même température et occupant un volume quelconque,

$$p = p_1 \frac{\mu_1}{\mu}.$$

Donc, pour passer du cas général que nous avons considéré précédemment, au cas que nous considérons maintenant, il suffit, dans les relations générales (*a*), (*b*), (*c*), de faire

$$m = \mu_1 p_1 \quad \text{et} \quad n = 0;$$

car alors ces équations se réduiront aux suivantes

$$\mu = \mu_1 \frac{p_1}{p}, \qquad (a')$$

$$\frac{M}{M_1} = \frac{p_1}{p}, \qquad (b')$$

$$p = p_1 \frac{M_1}{M}; \qquad (c')$$

et en observant que le rapport des volumes absolus est le même que celui des volumes spécifiques de la vapeur, on reconnaîtra que ces formules sont identiques avec celles que nous venons de déduire directement de la loi de Mariotte.

Donc, dans le cas du réchauffement de la vapeur, on pourra toujours se servir des formules générales déduites des équations (*a*), (*b*), (*c*). Il suffira seulement d'y introduire les deux conditions

$$m = \mu_1 p_1 \quad \text{et} \quad n = 0;$$

ce qui sera facile dès que l'on connaîtra le degré de température auquel la vapeur est réchauffée, puisque les tables donneront aussitôt les valeurs de μ_1 et p_1, c'est-à-dire le volume et la pression de la vapeur correspondant à cette température. Ainsi, comme ce cas se déduit si facilement du cas général, nous nous bornerons à traiter ce dernier, et nous ne reviendrons au cas exceptionnel du réchauffement de la vapeur qu'en traitant spécialement des machines où il peut se présenter.

Comme dans tous les calculs relatifs aux effets des machines, c'est le volume occupé par un poids donné de vapeur qui forme l'élément important du calcul, il est facile de reconnaître que l'emploi du principe de *conservation du maximum de densité de la vapeur* pendant son action dans les machines, et les formules par lesquelles nous l'avons représenté, feront éviter des erreurs considérables dans les résultats.

Si l'on considère une machine à condensation, où la vapeur se forme à 8 atmosphères, ou 120 livres par pouce carré, et se détende à 10 livres par pouce carré, dans le mode de calcul en usage on supposera que, pendant sa détente, la vapeur conservera sa température, et qu'ainsi son volume variera en raison inverse des pressions. Le volume de la vapeur à la pression de 120 lbs par pouce carré est 249 fois celui de l'eau qui l'a produite ; si sa température se conservait pendant son action dans la machine, son volume deviendrait, après la détente,

$$249 \times \frac{120}{10} = 2988.$$

La supposition que l'on fait revient donc à admettre que, sous la pression de 10 lbs par pouce carré, le volume de la vapeur serait 2988 fois celui de l'eau ; or, d'après les tables exactes, ce volume est 2422. On fait donc ainsi une erreur de $\frac{1}{5}$ en plus sur le volume réel de la vapeur, c'est-à-dire sur l'effet de la machine, et on l'évitera presqu'entièrement en fesant usage de notre formule, car elle donne, pour ce cas, 2426 au lieu de 2422, c'est-à-dire qu'elle diffère à peine du véritable volume de la vapeur.

Pour les machines sans condensation, l'erreur qui résulte de l'application de la loi de Mariotte est encore très-sensible, quoique moins considérable que dans les machines précédentes. En effet, si nous supposons une machine dans laquelle la vapeur se forme à la pression de 5 atmosphères, ou 75 livres par pouce carré, et se dépense à la pression de 30 livres par pouce carré, ou 2 atmosphères environ, comme le volume de la vapeur formée sous la pression de 75 livres par pouce carré est 380 fois le volume de l'eau, on voit que si l'action de la vapeur avait lieu sans que sa température changeât, son volume, à l'instant de son emploi, serait représenté par le nombre

$$380 \times \frac{5}{2} = 950\ ;$$

mais d'après les tables exactes, le volume de la vapeur formée à la pression de 30 livres par pouce carré est réellement 880 fois le volume de l'eau. En admettant par le

fait le premier nombre au lieu du second, on commet une erreur de $\frac{1}{12}$ environ, en trop, sur le volume réel de la vapeur, et, par conséquent, sur l'effet de la machine ; et cette erreur sera totalement évitée par l'emploi des tables du volume de la vapeur que nous avons données précédemment. En fesant usage de notre formule pour les machines sans condensation, on obtiendrait également pour le volume de la vapeur le nombre 880 ; on éviterait donc encore ainsi l'erreur mentionnée plus haut.

Cependant, nous devons ajouter que, pour des différences de pression peu considérables, comme elles se produisent dans un grand nombre de cas, l'erreur résultant de la loi de Mariotte peut devenir tout-à-fait négligeable.

ARTICLE II.

DES APPAREILS EN USAGE POUR MESURER LA FORCE ÉLASTIQUE DE LA VAPEUR.

§ I. *Du manomètre à siphon.*

Nous venons d'exposer les lois qui règlent l'action mécanique de la vapeur ; mais comme l'intensité de cette action dépend nécessairement de la force élastique ou pression de la vapeur, il convient maintenant de décrire les principaux appareils employés pour mesurer cette force. Ces appareils sont de deux sortes : ceux qui servent à mesurer la pression stable de la vapeur contenue dans un vase où cette pression ne varie pas, ce sont les *manomètres* ; et ceux qui servent à mesurer la pression moyenne de la vapeur contenue dans un vase où sa pression varie continuellement en raison du changement de volume du vase ou d'autres circonstances extérieures, et, dans ce dernier cas, c'est l'*indicateur* de Watt qu'il faut nécessairement employer.

Le *manomètre à mercure* ou *à siphon*, ainsi nommé parce que c'est le poids d'une colonne de mercure contenue dans un siphon qui sert à mesurer la pression de la vapeur, est un instrument construit sur le principe du baromètre ordinaire ; il est représenté dans la *fig.* 1, *pl. I.* M*bm* est un tube de fer recourbé en siphon et contenant du mercure dans ses deux branches jusqu'à la hauteur des points M et *m*, qui sont deux boutons vissés fermant deux petites ouvertures du tube ; FG est un réservoir contenant de l'eau, et il doit être rempli jusqu'à la hauteur du robinet *e*, qui sert à en laisser écouler le trop-plein ; enfin, *c* est un tube communiquant avec la chaudière ou le vase qui contient la vapeur, mais que l'on peut fermer à volonté au moyen d'un robinet *d*, placé à l'entrée du tube. Le haut de la branche M est fermé par un robinet R, et le haut de la branche *m* est, au contraire, ouvert à l'air extérieur. La vapeur, arrivant donc dans la partie supérieure du réservoir FG par le tuyau *c*, presse sur l'eau, en vertu de sa force élastique, refoule le mercure contenu dans la branche M et le fait

monter dans la branche *m* jusqu'au point où le poids du mercure, ainsi soulevé, fait équilibre à la pression de la vapeur venant de la chaudière, augmentée du poids de l'eau contenue dans la branche M. Un petit flotteur en métal, porté sur la surface du mercure dans la branche *m*, s'élève à mesure que le niveau monte dans cette branche, et un index S, suspendu au bout d'un cordonnet de soie passant sur une poulie de renvoi *p*, descend entre les deux branches du tube, et indique, sur une échelle graduée, les variations de niveau du mercure ou les pressions de la vapeur soumise à l'expérience. Quelquefois, au lieu du cordonnet et de l'index, la poulie *p* porte une aiguille qui tourne avec elle et qui indique, sur un cadran, les degrés de pression de la vapeur.

Quand on veut se servir de cet instrument, il faut d'abord lui faire subir quelques vérifications, sans lesquelles on ne pourrait compter sur son exactitude. La première consiste à s'assurer que le tube contient du mercure jusqu'à la hauteur des boutons *m* et M, et de l'eau jusqu'à la hauteur du robinet *e*. Pour cela, on ferme le robinet *d* pour interrompre l'arrivée de la vapeur sur le mercure, on ouvre le robinet supérieur R, et on dévisse le bouton M pour laisser sortir, par son ouverture, l'eau contenue dans le récipient FG. Ensuite on verse, par le robinet R, quelques gouttes de mercure dans le tube, jusqu'à ce qu'on le voie ressortir, comme trop plein, par le trou du bouton M; et, après avoir replacé le bouton, on verse de même de l'eau par le robinet R, jusqu'à ce qu'on en voie le trop-plein sortir par le robinet *e*, qu'on a eu soin d'ouvrir à cet effet; puis enfin, on referme le robinet supérieur R. Alors le mercure et l'eau s'élèvent en effet jusqu'à la hauteur marquée, et cette condition est nécessaire parce que le calcul des divisions de l'instrument, ou des pressions qu'il indique, est basé, comme on le verra dans un instant, sur ce que la branche *m* ne peut jamais contenir que du mercure, et sur ce que la branche M est remplie d'eau au-dessus du mercure, jusqu'à la hauteur du robinet *e*.

Cette première condition étant remplie, et tout restant dans le même état, on s'assure que dans ce moment l'aiguille de l'index marque exactement le point zéro, ou indique une pression *effective* nulle, ce qui doit avoir lieu puisque la pression dans la branche M, étant alors réduite à la pression atmosphérique, correspond nécessairement à une pression *effective* nulle. Si l'aiguille ne tombe pas exactement sur le point zéro, on l'y fait correspondre en rallongeant ou raccourcissant le cordonnet, ou en ajustant le cadran.

Après cette seconde vérification, l'instrument est prêt pour l'expérience. Alors, on ouvre le robinet *d* pour laisser arriver la vapeur dans le récipient FG; et lorsque l'air en a été chassé par le robinet *e*, on referme ce robinet avec précaution, et l'index marque sur l'échelle la pression de la vapeur.

Il est évident, du reste, que la première des vérifications dont nous venons de parler, relativement à la quantité de mercure contenue dans le tube, n'est né-

cessaire que rarement, ou la première fois qu'on se sert de l'instrument; ensuite, il suffit d'ouvrir souvent le robinet e pour laisser écouler le trop-plein d'eau qui s'amasse, par la condensation, dans le récipient FG, et de s'assurer en même temps que l'index tombe sur zéro, dans le moment que l'air est rentré dans la branche M.

Pour établir ou vérifier les divisions de cet instrument, un court calcul est nécessaire, et il est utile de l'expliquer ici. Supposons que la vapeur ait, dans le récipient, une pression absolue P, exprimée en livres par pouce carré ou en kilogrammes par centimètre carré, et que l'on veuille connaître à quelle hauteur doit alors se trouver le niveau du mercure dans la branche m. 1°. Comme nous avons vu que la branche M a d'abord été remplie de mercure jusqu'au point M, si l'on a eu soin de prendre ce point à moitié de la hauteur totale de l'instrument, il est clair que jamais il ne pourra y avoir que du mercure dans la branche m. 2°. Comme nous avons vu, en outre, que le réservoir FG a aussi été rempli d'eau jusqu'à la hauteur e, il est clair que, dans la branche M, la surface du mercure sera surmontée d'une colonne d'eau; et, si l'on a donné au récipient FG un diamètre suffisant, ce qui est facile, il est clair encore que, malgré le remplissage de la branche M, le niveau de l'eau n'aura baissé, dans le récipient, que d'une quantité négligeable, et que l'on pourra considérer cette colonne d'eau comme s'élevant jusqu'à la hauteur e. En outre, en appelant x la hauteur au-dessus du point m, à laquelle le mercure s'élèvera dans la branche m, en vertu de la pression P, comme le mercure qui passe dans la branche m provient de l'autre branche, il est clair que, dans cette dernière, le mercure aura baissé aussi d'une hauteur égale à x, de sorte que la différence de hauteur des deux colonnes de mercure sera exprimée par $2x$.

Cela posé, puisque le mercure se soutient dans la situation que nous venons de supposer, il faut qu'il y ait équilibre entre les pressions exercées dans chacune des deux branches du tube. Mais, d'une part, la pression exercée dans la branche m est produite par le poids d'une colonne de mercure de la hauteur $2x$ augmentée de la pression atmosphérique; et, d'autre part, en appelant k la hauteur verticale Me, la pression exercée dans la branche M est produite par la pression P plus le poids d'une colonne d'eau de la hauteur $x+k$. Il y a donc équilibre ou égalité entre ces quatre forces, et, pour pouvoir exprimer cette égalité par une équation, il suffit de rapporter ces forces à la même unité.

Or, la première est une colonne de mercure de la hauteur $2x$. De plus, en appelant h la hauteur d'une colonne de mercure d'un poids équivalent à la pression atmosphérique, et H celle d'une colonne de mercure d'un poids équivalent à la pression donnée P, il est clair que ces deux pressions pourront être remplacées respectivement par des colonnes de mercure des hauteurs h et H. Enfin, en appelant δ le rapport entre la densité du mercure et celle de l'eau, il est évident aussi que la colonne d'eau de la hauteur $(x+k)$ pourra être remplacée par

une colonne de mercure d'une hauteur réduite, exprimée par

$$\frac{x+k}{\delta}.$$

Donc, puisque nous avons vu qu'il y a équilibre ou égalité entre les quatre forces ci-dessus, distribuées comme il a été expliqué, il y aura de même égalité entre les quatre colonnes de mercure équivalentes. Donc, enfin on aura l'équation

$$2x+h=H+\frac{x+k}{\delta},$$

qui donne pour solution,

$$x=\frac{\delta}{2\delta-1}\left(H-h+\frac{k}{\delta}\right).$$

Cette équation fera, par conséquent, connaître la hauteur cherchée x, à laquelle sera élevé le mercure dans la branche m, par l'effet de la pression P; il suffit seulement, pour la résoudre numériquement, de calculer les hauteurs de mercure h et H, et de connaître la densité δ du mercure rapportée à celle de l'eau.

Si l'on emploie les mesures anglaises, la pression atmosphérique est de 14.71 livres par pouce carré, et la colonne de mercure, qui lui fait équilibre, a pour hauteur $h=29.92$ pouces. Par conséquent aussi, la colonne de mercure capable de remplacer la pression P sera connue par une simple proportion, ou par l'équation

$$H=29.92\,\frac{P}{14.71}.$$

Enfin, la densité du mercure rapportée à celle de l'eau est

$$\delta=13.568.$$

En introduisant donc ces valeurs, et faisant les réductions convenables, l'équation ci-dessus devient

$$x-0.03826\,k=1.036\,(P-14.71).$$

La quantité (P — 14.71), que contient cette équation, est ce qu'on nomme la pression *effective* de la vapeur, et, dans la pratique, c'est presque toujours sous cette forme qu'on exprime la pression de la vapeur. Pour avoir la hauteur de l'index de l'instrument correspondant à une pression effective donnée, il suffira donc de multiplier cette pression effective exprimée en livres par pouce carré, par le nombre 1.036. Le résultat sera la hauteur cherchée diminuée de la quantité constante 0.03826 k, et exprimée en pouces. Du reste, il faut observer que cette quantité 0.03826 k exprime la hauteur de l'index pour une pression effective nulle, ou

qu'elle donne le *zéro* de l'instrument ; car elle est la valeur de x pour le cas de

$$P - 14.71 = 0.$$

On pourra donc marquer, une fois pour toutes, ce point sur l'échelle, et ensuite en mesurant, à partir de ce point, les quantités exprimant les valeurs du produit

$$1.056\,(P - 14.71),$$

on aura tous les points de l'échelle que l'on voudra. Par exemple, pour une pression effective de 70 livres par pouce carré, la hauteur de l'index au-dessus de zéro sera

$$1.056 \times 70 = 73.95 \text{ pouces anglais.}$$

On ferait le même calcul pour tout autre point, mais cette recherche est inutile ; car, connaissant le point correspondant zéro et celui qui correspond à la pression effective maximum de l'instrument, en divisant l'intervalle en parties proportionnelles, l'échelle se trouvera convenablement graduée, puisqu'on vient de voir que la hauteur de l'index au-dessus du point zéro ne dépend absolument que de la pression effective, et lui est proportionnelle. Par exemple, si la hauteur au-dessus de zéro est de 74 pouces, pour une pression effective de 70 livres par pouce carré, la hauteur pour une pression de 35 livres sera de 37 pouces, ou sera égale à la demi-distance des deux points précédens.

Quand on fait usage des mesures françaises, la pression atmosphérique est de 1.033 kilogramme par centimètre carré, et l'équation précédente devient

$$x - 0.03826\,k = 38.194\,(P - 1.033).$$

Du reste, le calcul est entièrement semblable au précédent, et la hauteur x est alors exprimée en centimètres.

On vient de voir qu'une pression effective de 70 livres par pouce carré produit une élévation du mercure de 74 pouces au-dessus du point m, qui est le milieu de l'instrument, et par conséquent exige, dans le manomètre, une hauteur totale de 148 pouces ; c'est donc un peu plus de 2 pouces de hauteur par livre de pression effective à enregistrer. Ainsi, dans les machines à basse pression où la pression dans la chaudière n'excède jamais celle de l'atmosphère que de 4 ou 5 livres par pouce carré, et ne descend jamais que de quelques livres au-dessous du même point, il est clair que l'instrument n'exige que des dimensions très-modérées. Dans les machines à haute pression, il faut plus d'élévation ; mais on voit qu'une hauteur totale de 16 pieds, dont on peut prendre une partie en contre-bas du terrain, suffira pour que l'instrument puisse enregistrer une pression effective de 6 atmosphères. Il n'y a donc aucune difficulté à construire des manomètres capables de marquer les plus hautes pressions en usage jusqu'ici dans les machines à vapeur ; et comme l'instrument est d'ailleurs facile à construire, il ne devrait y avoir aucune machine à vapeur stationnaire, à haute ou basse pression, qui n'en fût pourvue.

§ II. *Du manomètre barométrique, ou manomètre du condenseur.*

Dans les machines à condensation, outre le manomètre précédent, on a encore besoin d'un autre instrument qu'on appelle *manomètre du condenseur*, ou *manomètre barométrique*, et qui sert à mesurer la pression, ou le vide imparfait, subsistant dans le condenseur après la condensation incomplète de la vapeur. Cet instrument est analogue au précédent; mais comme il ne doit mesurer que des pressions inférieures à la pression atmosphérique, cette condition introduit quelques légers changemens dans sa construction. C'est un siphon renversé, de verre ou de métal (*fig.* 6, *pl. I*), parfaitement calibré et rempli de mercure jusques un peu moins haut que la demi-longueur de chaque branche. D'un côté, il est ouvert à l'atmosphère, et, de l'autre, il est mis en communication avec le condenseur au moyen d'un petit tube de cuivre fermé par un robinet. Lorsque le vide est fait dans le condenseur au moyen de la pompe d'air, le vide se produit aussi dans la branche correspondante du manomètre; et, comme le mercure est pressé par le poids de l'atmosphère dans la branche opposée, il s'ensuit qu'il monte dans la branche en communication avec le condenseur, jusqu'à ce que la différence de poids des deux colonnes de mercure, jointe à la pression de la vapeur non condensée, fasse équilibre à la pression de l'atmosphère. Un flotteur, porté sur le mercure dans la branche ouverte, descend en même temps que le mercure monte du côté du condenseur, et indique, sur une échelle graduée, l'abaissement de la colonne de mercure, et, par conséquent, la pression de la vapeur non condensée. Pour que la tête de ce flotteur soit visible, on surmonte le tube de métal d'un tube de verre mastiqué, dans lequel monte et descend le flotteur. On voit que l'instrument est tout-à-fait semblable au précédent, à cela près que le mercure, au lieu de monter dans la branche en communication avec l'atmosphère, monte maintenant dans celle qui communique avec le condenseur, ce qui exige que cette dernière branche ait une hauteur suffisante; on voit aussi que le réservoir d'eau du manomètre précédent devient inutile, et que l'instrument acquiert plus de simplicité.

La graduation de l'échelle devient plus facile aussi, car il n'y a plus d'eau dans le tube, et ainsi l'on n'a plus à considérer que le poids de la colonne de mercure soulevée; en conséquence, pour graduer l'instrument, il suffit de savoir qu'une colonne de mercure de 29.92 pouces anglais de hauteur équivaut à la pression moyenne de l'atmosphère, et que chaque différence de niveau de 2.0346 pouces, dans le mercure de deux branches, ou chaque abaissement de 1.0173 pouce dans le niveau de celle qui communique avec l'atmosphère, produit une pression de 1 livre par pouce carré. On commencera donc par mesurer 14.96 pouces le long du tube, à partir du niveau du mercure, quand on laisse pénétrer l'air dans les deux branches, et le point ainsi déterminé sera celui qui indique le vide parfait ou le zéro de l'instrument, puisqu'il

correspond à une différence de niveau de 29.92 pouces entre les deux colonnes de mercure. Ensuite, à partir de ce point, on mesurera sur l'échelle des distances de 1.0173 pouce, et à chacune de ces distances correspondra une augmentation de pression de 1 livre par pouce carré au-dessus de zéro. Cette graduation se fera donc sans difficulté. Il faut seulement observer que la position du zéro de l'échelle, telle qu'on vient de la déterminer, ne sera rigoureusement exacte que pour le cas où la pression atmosphérique sera de 29.92 pouces de mercure; mais comme cette pression varie journellement, si l'on veut avoir égard à cette circonstance, ce qui est nécessaire pour les pressions très-faibles, il suffira de consulter, au moment de l'observation, un baromètre ordinaire, et de faire au zéro de l'instrument la correction nécessaire. Par exemple, si l'on trouvait que, pendant le temps de l'expérience, le baromètre indique seulement 28.92 pouces de mercure, il s'ensuivrait que toutes les pressions indiquées par l'échelle du manomètre, au-dessus de zéro, devraient être diminuées de 1 pouce de mercure mesuré sur la différence totale de niveau des deux branches, ou de 0.49 livre par pouce carré. Le contraire aurait lieu si le baromètre marquait une pression supérieure à 29.92 pouces de mercure.

En mesures françaises, le zéro de l'instrument sera placé à 38 centimètres du niveau naturel du mercure, et chaque intervalle de 3.677 centimètres, le long de la branche ouverte à l'extérieur, donnera un accroissement de pression, au-dessus de zéro, de 1 dixième de kilogramme par centimètre carré. La correction sera de 0.0136 kilogramme par centimètre carré pour chaque centimètre de variation du baromètre.

On construit également le manomètre du condenseur avec un tube de verre droit, communiquant à sa partie supérieure, par un petit tube de cuivre, avec le condenseur, et plongé par son extrémité inférieure dans une cuvette remplie de mercure (*fig.* 3, *pl. I*). Lorsque le vide est fait dans le condenseur, le mercure monte de la cuvette dans le tube, jusqu'à ce que la colonne de mercure ainsi soulevée, jointe à la pression de la vapeur non condensée, fasse équilibre à la pression atmosphérique. Dans ce cas, toute la différence de niveau du mercure se produit donc dans une seule branche, puisque le niveau dans la cuvette reste sensiblement constant; ainsi, il est évident que les divisions de l'échelle doivent alors être doubles de celles de la disposition précédente, c'est-à-dire que le zéro de l'instrument sera placé à 29.92 pouces au-dessus du niveau de la cuvette, et qu'à chaque intervalle de 2.0346 pouces correspondra un accroissement de 1 livre par pouce carré au-dessus de zéro. De même chaque variation de 1 pouce du baromètre produira une différence de 0.49 livre par pouce carré, qu'on devra retrancher ou ajouter à la pression indiquée par l'échelle. En mesures françaises, le zéro de l'échelle sera à 76 centimètres du niveau de la cuvette; chaque intervalle de 7.354 centimètres correspondra à un accroissement de 0.1 kilogramme par centimètre carré, et la correction sera de 0.0136 kilogramme par centimètre de variation du baromètre; du reste, il est clair que, dans les deux constructions, la hauteur totale de l'instrument n'a pas besoin d'excéder 32 pouces anglais, ou

80 centimètres environ. Il doit toujours y avoir un petit robinet sur le tube de cuivre qui conduit au condenseur, afin de pouvoir intercepter la communication quand on ne fait pas usage de l'instrument.

§ III. *Du manomètre d'air et de quelques autres instrumens employés pour mesurer la pression de la vapeur.*

Le *manomètre d'air* est un instrument également employé pour mesurer la force élastique de la vapeur, et l'usage s'en est introduit assez généralement dans les machines à haute pression, parce que la hauteur qu'il faut donner au manomètre à siphon, pour l'appliquer à ces machines, le rend dispendieux et peu commode à établir.

Cet instrument représenté dans la *fig.* 7, *pl. I,* consiste en un tube de verre *t*, *t*, scellé par le haut et contenant de l'air comprimé, qui indique, par la réduction de son volume, la pression exercée sur lui par la vapeur. L'air ne doit pas occuper toute la hauteur du tube; c'est pourquoi on renverse d'abord celui-ci, et, après y avoir versé une petite quantité de mercure, on le retourne en plongeant son extrémité ouverte dans une cuvette AB remplie de mercure. Ensuite, on place sur la cuvette un couvercle boulonné et mastiqué, au travers duquel on fait également passer le tube de verre, en le mastiquant à son insertion, et faisant attention qu'il ne touche pas tout-à-fait le fond du bassin pour que le mercure puisse monter et descendre librement dans le tube. Un tuyau C, qui traverse le fond de la cuvette, conduit à la chaudière ou au vase contenant la vapeur, et on peut le fermer à volonté au moyen d'un robinet *d*, qui interrompt alors toute communication entre la cuvette et la vapeur. Le long du tube de verre, qui doit être exactement cylindrique, est fixée une échelle qui, d'après les hauteurs du mercure, indique les pressions correspondantes à la compression de l'air. On conçoit en effet que, si l'on ouvre le robinet inférieur et qu'on laisse la vapeur arriver, par le tuyau C, dans l'intérieur de la cuvette, cette vapeur pressera sur le mercure et le fera monter dans le tube, jusqu'à ce que la force élastique de l'air comprimé dans le haut du tube, plus le poids de la colonne de mercure soulevée, fasse équilibre à la pression de la vapeur. C'est, par conséquent, d'après cette condition que doivent être établies les divisions de l'instrument.

A cet effet, soit P la pression absolue de la vapeur exprimée en pouces ou en centimètres de mercure, ρ la pression atmosphérique exprimée d'une manière semblable. Soit de même L la longueur totale du tube, depuis son sommet jusqu'au niveau du mercure dans la cuvette AB, niveau qu'on peut supposer constant, si la cuvette a une surface suffisante relativement à l'aire du tube. Enfin soit h la hauteur du niveau du mercure dans le tube, au-dessus de celui de la cuvette, lorsque l'instrument ne supporte que la pression atmosphérique; et H la hauteur du même niveau lorsque l'instrument est soumis à la pression P.

On sait, d'après la loi de Mariotte ou Boyle, que les espaces occupés par l'air comprimé sont en raison inverse des pressions qu'il suppporte. Or, quand l'instrument est exposé à la pression atmosphérique ρ, puisque cette pression est alors équilibrée par le ressort de l'air contenu dans le tube, plus le poids de la colonne de mercure dont la hauteur est h, il est clair que le ressort de l'air intérieur, ou la pression qu'il supporte, est représenté par

$$\rho - h;$$

de même le ressort de l'air intérieur, comprimé sous la pression P de la vapeur, est exprimé par

$$P - H;$$

enfin les espaces, respectivement occupés par l'air comprimé, sous les pressions extérieures ρ et P, sont $L - h$ et $L - H$. Donc, d'après la loi de Mariotte, on a la condition

$$\frac{L-h}{L-H} = \frac{P-H}{\rho-h},$$

d'où l'on tire

$$P = H + (\rho - h)\frac{L-h}{L-H}.$$

Cette équation donne donc la pression cherchée ; cependant, comme cette pression se trouve ici exprimée en pouces ou en centimètres de mercure, c'est-à-dire représentée par la colonne de mercure capable de lui faire équilibre, il reste encore une courte transformation à faire pour l'obtenir en mesures ordinaires, c'est-à-dire en livres par pouce carré, ou en kilogrammes par centimètre carré. Pour cela, il suffit d'observer qu'une colonne de mercure, de la hauteur de 29.92 pouces anglais, équivaut à une pression de 14.71 livres par pouce carré. La pression de la colonne de mercure de la hauteur P sera donc représentée par

$$P' = \frac{14.71}{29.92} P = 0.4915 P;$$

par conséquent, on aura définitivement

$$P' = 0.4915\left[H + (29.92 - h)\frac{L-h}{L-H}\right].$$

Dans cette expression, les dimensions L, H et h seront exprimées en pouces, et le résultat du calcul sera la pression absolue de la vapeur exprimée en livres par pouce carré. Par exemple, si l'on suppose

$$L = 15 \text{ pouces et } h = 3 \text{ pouces},$$

on trouvera que, pour une hauteur de mercure $H = 9$ pouces dans le tube, la

pression absolue correspondante de la vapeur sera 30.89 livres, ou la pression effective 16.18 livres par pouce carré.

Au moyen de cette relation, on déterminera une série de pressions absolues correspondantes à diverses hauteurs principales du mercure dans le tube de verre; et, en divisant convenablement les intervalles entre les points déterminés, on formera enfin une échelle complète des hauteurs du mercure, pour toutes les pressions absolues ou effectives de la vapeur.

Si le tube plonge simplement dans la cuvette sans avoir été d'abord partiellement rempli de mercure, la même formule donnera les divisions de l'instrument en y faisant seulement $h = 0$. Dans le même cas, on formera une échelle approximative de l'instrument en divisant la hauteur du tube au-dessus du mercure, en deux parties égales, pour avoir le point correspondant à 2 atmosphères de pression absolue ou 30 livres de pression absolue par pouce carré; en trois, quatre, cinq parties égales, etc., pour avoir les points correspondans à 3, 4, 5 atmosphères absolues. Cette division de l'instrument revient à négliger le poids de la colonne de mercure soulevée dans le tube qui, comme nous l'avons vu, doit réellement être déduite de la pression de la vapeur, pour avoir le ressort de l'air comprimé.

En mesures françaises, la relation précédente est

$$P' = 0.01359\left[H + (76 - h)\frac{L - h}{L - H}\right],$$

dans laquelle les longueurs L, H et h doivent être exprimées en centimètres, et la valeur résultante de P' sera la pression absolue de la vapeur exprimée en kilogrammes par centimètre carré.

On pourra donc, au moyen des formules précédentes, effectuer la graduation de l'instrument; mais on doit reconnaître que cette graduation est sujette à des inexactitudes, surtout pour les pressions élevées, parce qu'à mesure que l'air se comprime, les divisions correspondantes à un même accroissement de pression deviennent de plus en plus petites. En outre, la loi de Mariotte, sur laquelle est fondée la division de l'échelle, n'est vraie qu'autant que l'air conserve toujours la même température, et cette supposition est d'autant moins exacte dans l'application de l'instrument, que la pression et, par conséquent, la température de la vapeur subissent de plus grandes variations. De plus, l'air contenu dans le tube doit être parfaitement exempt d'humidité, car celle-ci se changerait en vapeur, dans le moment de l'expérience, et fausserait les résultats; enfin, si, par accident, on suspend le travail de la machine sans avoir fermé le robinet d, il peut arriver que le vide se produise dans la cuvette, et qu'une bulle d'air sorte du tube, et alors toutes les divisions de l'échelle cessent d'être exactes. Ce n'est donc qu'après avoir vérifié si, quand on laisse entrer l'air atmosphérique dans la cuvette, en détachant l'instrument, le niveau du mercure monte effectivement dans le tube, au

point marquant 1 atmosphère de pression absolue, et après avoir vérifié quelques-unes des divisions de l'échelle, que l'on peut avoir confiance dans les indications du manomètre d'air. Comme le manomètre à siphon n'est sujet à aucun de ces inconvéniens, on ne doit pas hésiter à le préférer toutes les fois que son usage est possible, c'est-à-dire, pour toutes les machines stationnaires. Quand aux machines locomotives, le manomètre à siphon ne leur est point applicable, et, par conséquent, pour ces machines, ainsi que pour celles des bateaux à vapeur à haute pression, le manomètre d'air est un instrument très-utile. Nous avons indiqué, dans notre *Traité des Locomotives*, la forme la plus convenable à lui donner pour cet emploi spécial; c'est pourquoi nous nous contentons de renvoyer à cet ouvrage pour plus de détails à cet égard.

Outre les deux manomètres que nous venons de décrire, il y a encore quelques autres appareils employés pour mesurer la pression de la vapeur, comme le *thermomanomètre* et la *soupape à balance à ressort*. Le thermomanomètre est un thermomètre sur l'échelle duquel on remplace les températures de la vapeur par les pressions qui leur correspondent, d'après la table que nous avons rapportée dans le § III de l'article I de ce chapitre. La soupape à balance est une soupape dont le levier tire sur un ressort dont les tensions sont graduées, de sorte que l'effort exercé par la vapeur pour soulever la soupape est constamment indiqué par l'échelle du ressort. Ces instrumens sont très-utiles dans les machines locomotives, et peuvent l'être également dans les bateaux à vapeur; mais, comme ils sont beaucoup moins exacts que le manomètre à siphon, on ne doit pas les employer pour les machines stationnaires; du reste, nous renvoyons encore, pour ce qui les concerne, à notre *Traité des Locomotives*.

§ IV. *De l'indicateur de Watt.*

Les instrumens que nous venons de décrire donnent le moyen de mesurer la pression ou force élastique de la vapeur, lorsque cette force est constante, c'est-à-dire, lorsque la vapeur est enfermée dans un vase où elle reste dans un état stable, comme dans la chaudière ou le condenseur d'une machine à vapeur. On observe alors, en effet, que la pression de la vapeur reste très-longtemps sans éprouver aucune variation sensible, de sorte que la hauteur du mercure dans les instrumens conserve un niveau constant qu'il est facile d'observer et d'enregistrer; mais, lorsqu'on veut appliquer les mêmes instrumens au *cylindre* à vapeur des machines, on trouve que la hauteur du mercure varie continuellement dans une très-grande étendue, et que la rapidité des oscillations ne permet pas même d'en évaluer facilement la moyenne. Il faut donc recourir alors à un autre appareil.

L'*indicateur de Watt* est l'instrument dont on se sert pour cet usage : c'est un petit cylindre de 1.6 pouce de diamètre intérieur sur 1 pied environ de longueur,

parfaitement calibré et contenant un piston plein (*fig.* 8 et 9, *pl. I*), qui glisse librement dans le cylindre, et qu'on recouvre d'huile pour empêcher l'échappement de la vapeur. Pour maintenir le piston dans la direction précise de l'axe du cylindre, sa tige traverse un anneau directeur *a*. Le cylindre se termine, à sa partie inférieure, par un ajutage taraudé en dehors, et que l'on peut, par conséquent, visser dans le trou à huile du cylindre de la machine, de manière que la vapeur passe alors de ce cylindre dans celui de l'indicateur, et vient soulever le petit piston. Un robinet, placé sur l'ajutage de communication, permet d'ailleurs d'établir ou de suspendre cette communication à volonté. Le piston de l'indicateur est attaché à un ressort en hélice, dont l'autre extrémité est fixée au point *a*, sur un montant ou châssis que porte le cylindre de l'indicateur.

Quand les deux extrémités de ce cylindre sont en communication avec l'atmosphère, le ressort est au repos, et le petit piston est maintenu vers le milieu du cylindre; mais, quand la vapeur pénètre sous le piston, si cette vapeur a une plus grande force élastique que l'atmosphère, elle fait monter le piston jusqu'à ce que l'élasticité du ressort fasse équilibre à l'excès de la pression de la vapeur sur celle de l'atmosphère; et si, au contraire, la pression de la vapeur est moindre que celle de l'atmosphère, celle-ci, en appuyant sur le piston, le fait descendre dans le cylindre jusqu'à ce que la résistance du ressort à l'extension fasse équilibre à l'excès de la pression atmosphérique sur celle de la vapeur. La tête de la tige du piston monte et descend, par conséquent, selon la force élastique de la vapeur soumise à l'expérience; et des divisions, marquées le long d'une échelle fixée au châssis, font connaître immédiatement la pression de cette vapeur.

Pour graduer l'instrument, il faut observer que le point correspondant à une pression effective nulle ou à une pression absolue égale à celle de l'atmosphère, est celui où se tient le piston quand l'instrument est détaché de la machine, puisque les deux extrémités du cylindre communiquent alors avec l'atmosphère. On marquera donc d'abord ce point; ensuite les divisions, au-dessus et au-dessous, s'obtiendront par expérience, en chargeant le ressort de poids donnés, soit pour le comprimer, soit pour le développer, et en divisant ces poids par l'aire du piston de l'indicateur, pour avoir la pression qu'ils exercent par unité de surface: par exemple, si le piston a un diamètre de 1.6 pouce, qui donne 2 pouces carrés de surface, chaque poids de 2 livres, placé sur le ressort, produira 1 livre de pression par pouce carré. Une fois ces divisions marquées au-dessus et au-dessous de la ligne de repos du ressort, si l'on veut que l'instrument donne les pressions *effectives* de la vapeur, il faudra placer le zéro de l'échelle au point de repos du ressort, puisque la pression effective est alors nulle; mais, si l'on veut au contraire que l'instrument indique les pressions *absolues* de la vapeur, il faudra mettre le zéro de l'échelle à 14.71 livres par pouce carré, ou 1.033 kilogramme par centimètre carré, au-dessous du point de repos, lequel sera coté alors comme représentant une pression absolue égale à celle de l'atmosphère. Cha-

que fois qu'on veut faire usage de l'instrument, il est bon de s'assurer de l'exactitude de l'échelle, qui deviendrait fausse si le piston prenait plus de frottement dans le cylindre; cette circonstance rend nécessaire de tenir l'instrument très-propre, et d'y mettre de l'huile fraîche avant de l'employer à des observations.

Pour que l'indicateur puisse enregistrer de lui-même les pressions successives et variées de la vapeur, et en conserver une trace permanente, la tige du petit piston porte un crayon *t*. qui y est maintenu par le moyen d'un porte-crayon monté sur une bague et fixé à la tige par une vis de pression. En outre, le châssis de l'indicateur se prolonge au-dessus de la tête du ressort, et, en ce point, il se termine par un cadre en bois portant deux rainures dont la direction est perpendiculaire à celle de la tige du piston, et dans lesquelles glisse une planchette recouverte d'une feuille de papier. Cette planchette est attachée, d'un côté, à une corde *b* fixée au balancier de la machine, et, de l'autre côté, à une seconde corde *e* portant un contre-poids. D'après cette disposition, lorsque le balancier de la machine monte, c'est-à-dire pendant que le piston à vapeur exécute sa course dans un sens, la planchette est tirée par la corde du balancier dans la direction de droite à gauche, par exemple, et ensuite, lorsque le balancier redescend, ou pendant la course inverse du piston, la planchette est ramenée, au contraire, de gauche à droite par l'effet du contre-poids. D'autre part, le crayon fixé à la tige du piston de l'indicateur est pressé contre la planchette par un petit ressort; il laisse donc sur le papier une trace à une hauteur plus ou moins grande, selon que la pression de la vapeur est plus ou moins élevée dans la portion du cylindre en communication avec l'instrument; et, comme la planchette se meut en même temps, mais dans une direction perpendiculaire à celle de la tige du petit piston, il résulte de la combinaison de ces deux mouvemens une courbe analogue à celle de la *fig*. 8 ou de la *fig*. 10, mais dont la forme précise dépend des circonstances diverses dans lesquelles travaille la machine. De plus, nous avons vu que, pendant deux courses consécutives, la planchette marche dans un sens d'abord, puis dans un sens contraire ensuite: il s'ensuit donc que, pendant ces deux courses, la courbe sera tracée d'abord vers la droite, puis reviendra vers la gauche: et comme, après la terminaison de deux oscillations, la machine revient périodiquement au même point, on voit que l'ensemble des deux courses produira toujours une courbe se repliant sur elle-même ou une courbe fermée. Dans cette courbe, la partie supérieure, qui correspond au maximum de pression de la vapeur, sera nécessairement décrite pendant que le côté du cylindre de la machine où est fixé l'indicateur, communique avec la chaudière, et la partie inférieure sera tracée pendant que le même côté du cylindre communique avec le condenseur. Si donc, après que la machine a exécuté ses deux courses, on retire la planchette, et que l'on y trace d'abord la ligne horizontale OX, marquant la hauteur où se tient le crayon quand l'indicateur marque une pression absolue égale à zéro, puis la ligne verticale OY contenant l'échelle de l'instrument, on pourra, en prenant à l'échelle la hauteur des points de la courbe au-dessus de la

ligne OX, c'est-à-dire en mesurant les ordonnées de la courbe, connaître quelle était la pression absolue de la vapeur, en chacun des points de la course du piston. Par conséquent aussi, en prenant approximativement la moyenne entre toutes les ordonnées mp, $m'p'$, $m''p''$ de la courbe supérieure, ou entre toutes les ordonnées nq, $n'q'$, $n''q''$ de la courbe inférieure, on aura la pression absolue *moyenne* exercée par la vapeur sur chaque unité de la course du piston, soit pendant le temps de son action motrice dans le cylindre, soit pendant le temps de son action résistante contre le piston.

En outre, nous avons dit que la courbure supérieure correspond au moment d'action de la vapeur dans le cylindre de la machine, et la courbure inférieure au moment de l'échappement ou de la condensation de cette vapeur. Ces deux effets sont ici étudiés successivement sur une même face du piston de la machine; mais, comme des effets semblables ont lieu en même temps sur la face opposée, il en résulte qu'on peut considérer la courbe inférieure comme celle qui serait observée dans la partie opposée du cylindre, pendant que la courbe supérieure se produit dans la portion où la vapeur exerce son effort utile. D'après cette remarque, on voit que la pression *utile* de la vapeur, en chacun des points de la course du piston, peut être connue en retranchant des hauteurs ou ordonnées de la courbe supérieure, celles de la courbe inférieure qui correspondent au même point; seulement, pour avoir celles-ci, il faut faire attention que, tandis que la courbe supérieure est décrite en partant du point A (*fig.* 10, *pl. I*), par la vapeur agissant sur le piston, la courbe inférieure, ou du moins une courbe pareille, est décrite, en partant du point E, par la vapeur condensée ou s'échappant de dessous le piston. Ce sont donc les ordonnées des deux courbes, situées à la même distance de leurs origines respectives, que l'on doit soustraire l'une de l'autre. Ainsi, par exemple, l'ordonnée mp représente la pression absolue de la vapeur motrice, lorsque le piston a parcouru, à partir du commencement de sa course, un espace proportionnellement représenté par Pp; et l'ordonnée nq, prise en mesurant l'espace Qq égal à Pp, représente la pression de la vapeur résistante, au même point de la course du piston; par conséquent, la pression *utile* de la vapeur, au point p, sera exprimée par la différence $mp - nq$. Par conséquent encore, en prenant la moyenne entre un nombre suffisant d'ordonnées de la courbe supérieure et la moyenne entre les ordonnées semblables de la courbe inférieure, puis prenant leur différence, on aura la pression *utile moyenne* exercée par la vapeur dans le cylindre de la machine, par unité de la course parcourue par le piston.

Le procédé que nous venons d'indiquer fera connaître la pression utile moyennement exercée par la vapeur sur toute la course du piston; mais il y a encore un autre moyen de parvenir au même résultat. En effet, on remarquera que, si l'on connaissait l'aire de la surface PABCEQ comprise entre la ligne OX et la courbe supérieure, on pourrait construire sur la base PQ un rectangle de surface équivalente; il suffirait évidemment pour cela de diviser la surface donnée

ou le nombre de pouces carrés, par exemple, dont elle se compose, par la longueur de la ligne PQ, ou par le nombre de pouces que contient cette ligne. Le quotient serait la hauteur d'un rectangle équivalent à l'aire de la courbe, puisque cette hauteur, multipliée par la base PQ, donnerait pour produit la surface donnée; mais on remarquera que cette hauteur serait en même temps la valeur moyenne de toutes les ordonnées *mp*, puisque, répétée sur toute la longueur de la base commune PQ, elle reproduirait la même surface. De même, si l'on connaissait la surface comprise entre la ligne OX et la courbe inférieure, on pourrait, par un procédé semblable, trouver un rectangle ayant la base PQ et une surface équivalente, et la hauteur de ce rectangle serait encore la moyenne des ordonnées de la courbe inférieure. Donc, en retranchant préalablement les deux surfaces l'une de l'autre, et construisant sur la ligne PQ un rectangle équivalent à leur différence, la hauteur de ce rectangle sera la différence entre les deux moyennes précédentes, et représentera, par conséquent, la pression *utile* moyenne de la vapeur dans le cylindre de la machine. Or, la différence des surfaces limitées par les deux courbures, supérieure et inférieure, est précisément la surface comprise dans l'intérieur de la courbe fermée, ou la surface ABCEGA. Donc enfin, en divisant cette surface par la ligne PQ, on aura une ligne représentant la pression utile moyenne de la vapeur dans le cylindre, et on pourra la comparer à la pression dans la chaudière, pour savoir quelle portion de cette force a été utilisée dans le cylindre; ou bien, si l'on élève, sur la ligne PQ, une perpendiculaire représentant à l'échelle la pression dans la chaudière, le rectangle ainsi construit sera à la surface comprise dans la courbe, comme la pression dans la chaudière est à la pression utile de la vapeur dans le cylindre de la machine. Tout se réduit donc à mesurer la surface comprise dans la courbe. Il y a pour cela divers instrumens connus; mais un moyen facile consiste à découper d'abord cette courbe avec des ciseaux dans un morceau de carte ou de papier d'une épaisseur bien égale, puis à tracer, sur la même feuille de papier, et à découper ensuite un rectangle ayant la base PQ et une hauteur représentant à l'échelle la pression de la vapeur dans la chaudière; et enfin à comparer les poids respectifs des deux figures ainsi découpées. Si l'épaisseur du papier est bien uniforme, le rapport des deux poids sera celui des surfaces, et, par conséquent, ce sera le rapport de la pression *utile* moyenne de la vapeur dans le cylindre, à la pression dans la chaudière. Ce procédé est suivi quelquefois, et c'est pourquoi nous avons jugé nécessaire de le rapporter ici; mais on trouvera beaucoup plus simple de mesurer, comme nous l'avons dit plus haut, un nombre suffisant d'ordonnées de la courbe, et d'en prendre la moyenne.

On construit aussi des indicateurs dans lesquels la planchette mobile est remplacée par un cylindre de métal tournant sur lui-même. Celui-ci est tourné dans un sens par un cordon attaché au balancier de la machine et ramené à sa position primitive par un ressort intérieur à spirale, qui fait les fonctions du contre-poids

employé dans la construction précédente. La feuille de papier destinée à recevoir la courbe se place sur le cylindre, comme elle se plaçait auparavant sur la planchette, et le crayon est pressé contre le cylindre au lieu de l'être contre la planchette; il n'y a donc aucune différence de principe entre les deux instrumens. *L'indicateur à spirale* a l'avantage d'être plus petit, et, par conséquent, plus portatif; mais comme on n'y emploie pas d'huile, ce qui rend le piston sujet à gripper dans le cylindre, et que la courbe tracée sur le papier a de beaucoup moindres dimensions, il offre un peu moins de garantie d'exactitude.

§ V. *Tableau comparatif des divers modes d'exprimer la pression de la vapeur.*

Comme la pression de la vapeur s'exprime de plusieurs manières, et que nous n'en employons qu'une seule dans cet ouvrage, nous terminerons ce chapitre en donnant un tableau de correspondance des divers modes d'exprimer la pression de la vapeur, en mesures françaises et anglaises.

Tableau comparatif des divers modes d'exprimer la pression de la vapeur.

PRESSION ABSOLUE DE LA VAPEUR.							EXCÈS DE CETTE FORCE sur la pression atmosphérique, ou pression dite *effective* dans les machines à haute pression.	
	EN MESURES ANGLAISES.			EN MESURES FRANÇAISES.				
En atmosphères.	En livres par pouce carré.	En livres par pouce circulaire.	En pouces de mercure.	En kilogr. par centimètre carré.	En kilogr. par centimètre circulaire.	En centim. de mercure.	En livres par pouce carré.	En kilogr. par centimètre carré.
1	14.71	11.55	29.92	1.033	0.812	76	0.00	0.000
1.5	22.06	17.33	44.88	1.549	1.217	114	7.35	0.516
2	29.41	23.10	59.84	2.065	1.623	152	14.71	1.033
2.5	36.77	28.88	74.80	2.582	2.029	190	22.06	1.549
3	44.12	34.65	89.76	3.099	2.435	228	29.41	2.066
3.5	51.47	40.43	104.72	3.615	2.841	266	36.77	2.582
4	58.82	46.20	119.68	4.132	3.246	304	44.12	3.099
4.5	66.18	51.98	134.64	4.648	3.652	342	51.47	3.615
5	73.53	57.75	149.60	5.165	4.058	380	58.82	4.132
5.5	80.88	63.53	164.50	5.681	4.464	418	66.18	4.648
6	88.24	69.30	179.52	6.198	4.870	456	73.53	5.165
6.5	95.59	75.08	194.48	6.714	5.275	494	80.88	5.681
7	102.94	80.85	209.44	7.231	5.681	532	88.24	6.198
7.5	110.30	86.53	224.40	7.747	6.087	570	95.59	6.714
8	117.65	92.40	239.36	8.264	6.493	608	102.94	7.231

CHAPITRE III.

DESCRIPTION DES PRINCIPAUX APPAREILS DONT SE COMPOSENT LES MACHINES A VAPEUR.

§ I. *Des différentes formes de chaudières en usage, ou des chaudières à fond concave, cylindrique, à foyer intérieur, à bouilleurs, locomotive et marine.*

Nous nous proposons, dans ce chapitre, de présenter tout ce qui, sous le rapport pratique, est applicable à la généralité des machines à vapeur, c'est-à-dire, que nous y donnerons la description de chacune des parties principales qui se rencontrent dans toutes les machines, et des appareils accessoires qui en dépendent. Par ce moyen, lorsque, dans la suite, nous traiterons spécialement des divers systèmes de machines à vapeur, nous n'aurons plus qu'à indiquer l'emplacement ou la fonction particulière de chacun des appareils qui les composent, en renvoyant simplement à l'explication que nous allons en donner maintenant, sans être obligé d'entrer chaque fois dans une nouvelle description à cet égard. Cependant, comme le but de cet ouvrage est d'expliquer l'action des machines plutôt que leur construction, nous nous bornerons, le plus souvent, à indiquer les formes et les dispositions le plus en usage, sans nous astreindre à donner des dessins tout-à-fait détaillés, ni des descriptions spéciales de chaque manière de construire les appareils.

On sait que, dans toute machine à vapeur, la vapeur est d'abord formée dans un vaisseau séparé qu'on nomme la chaudière, où il est nécessaire d'entretenir la vaporisation au même taux, l'eau au même niveau et la pression au même degré; puis cette vapeur doit être distribuée dans le cylindre, d'un côté ou de l'autre du piston, selon le sens dans lequel celui-ci doit recevoir l'impulsion; ensuite, quand le piston exécute son mouvement, il faut que ce mouvement ait lieu dans la direction précise de l'axe du cylindre; en même temps, il faut aussi que la vapeur inutile disparaisse du côté du piston opposé à l'action de la vapeur arrivant de la chaudière, sans quoi celle-ci ne pourrait avoir d'effet; enfin, pour le bon usage de la machine, son mouvement doit être parfaitement régulier, et il convient d'avoir des moyens de constater la vitesse et les effets produits par les machines, dans les travaux industriels. Les principaux détails à con-

sidérer sont donc : les diverses formes de chaudières en usage ; les appareils accessoires destinés à régler leur alimentation, à reconnaître la hauteur d'eau dans leur intérieur, à prévenir leurs explosions et à régulariser leur vaporisation ; les appareils spéciaux ou soupapes qui servent à distribuer la vapeur d'une manière convenable dans les cylindres et les combinaisons mécaniques employées pour les faire mouvoir au moyen de la machine elle-même ; les dispositions propres à diriger ou maintenir la tige du piston pendant les mouvemens oscillatoires qu'il communique au grand balancier; les appareils de condensation de la vapeur, et ceux qui en assurent les fonctions, soit en amenant l'eau froide qui sert à la condensation, soit en enlevant l'eau chaude qui en provient ; les appareils destinés à produire la parfaite régularité du mouvement, et enfin ceux qui, sans faire précisément partie de la machine, sont en usage pour constater sa vitesse ou pour déterminer ses effets utiles dans les travaux auxquels elle est employée. Ce sont ces divers appareils que nous allons décrire succinctement dans ce chapitre, en les traitant, autant que possible, indépendamment de tout système particulier de machines auquel ils pourraient être appliqués.

Il y a plusieurs espèces de chaudières que l'on choisit, selon les différentes machines, d'après les conditions principales auxquelles ces machines sont assujetties, ou le but auquel on les destine. Ainsi, dans toutes les machines à vapeur, on recherche, autant que possible, pour la chaudière, la solidité, la modicité du prix et l'économie de combustible; mais, dans les machines à basse-pression, où la chaudière ne supporte, de la part de la vapeur, qu'un effort modéré, on s'attache principalement à l'économie d'achat et de combustible ; dans les machines qui travaillent à haute pression, et où l'on a besoin d'obtenir une solidité considérable pour résister à la force élastique de la vapeur, on recherche une forme capable d'une grande résistance, et c'est la forme cylindrique qui est adoptée ; dans les machines destinées aux bateaux à vapeur, on donne le choix à la forme qui, économique sous le rapport du combustible, occupe en même temps le moins d'espace possible dans le navire; et, enfin, dans les locomotives, on sacrifie tout à la production rapide de vapeur. Ces diverses conditions ont donc naturellement produit diverses formes de chaudières. On en compte six principales, dont nous allons expliquer la disposition.

1°. La *chaudière à fond concave*, ou *chaudière-waggon*, ainsi nommée, parce qu'elle offre à-peu-près la forme d'un fourgon, ou waggon chargé, est représentée (*fig.* 11 et 12, *pl. II*). *a* est la grille du foyer, sur laquelle on place le combustible ; *b*, *b'*, *b''* sont les conduits que suivent la flamme et les gaz chauds, en contournant la chaudière jusqu'à leur arrivée dans la cheminée ; *c* est le corps de la chaudière, convexe en-dessus et concave en dessous, pour y recevoir plus efficacement l'action du feu. Dans ce système, la flamme, appliquée sous la chaudière, est d'abord en contact avec elle dans toute la longueur du fond ; ensuite, elle revient sur elle-même en suivant le carneau ou conduit latéral *b* ; puis, passant en *b'* en avant de la chau-

dière, dans l'épaisseur du massif de maçonnerie, elle suit le carneau b'', qui la conduit à la cheminée. On voit que, en parcourant ainsi trois fois la longueur de la chaudière, la flamme ou les gaz chauds, avant de s'échapper dans l'atmosphère, communiquent à l'eau une grande partie du calorique qu'ils contiennent. Quand ces chaudières sont très-grandes, elles sont souvent *à tube intérieur* (*fig.* 13, *pl. II*). Dans ce cas, la flamme parcourt d'abord le dessous de la chaudière; puis elle revient vers le foyer en suivant un tuyau horizontal *b* contenu dans la chaudière même, et qui la parcourt dans toute sa longueur, en restant toujours au dessous du niveau de l'eau; ensuite, en sortant de ce tuyau, la flamme se partage entre les carneaux latéraux b', b'', qui la conduisent à la cheminée.

La chaudière-waggon a l'avantage d'être peu dispendieuse, d'être facile à réparer et d'offrir à l'action de la flamme une surface concave très-propre à en recueillir tout le calorique; elle est en usage pour les machines stationnaires à basse pression; c'est-à-dire pour les machines de Watt à double et à simple action, et pour les machines atmosphériques.

2°. La *chaudière cylindrique à foyer en dessous* (*fig.* 14, *pl. II*) offre une disposition analogue à la chaudière-waggon que nous venons de décrire, c'est-à-dire que la flamme parcourt de même d'abord le dessous de la chaudière, puis ses deux faces latérales, et se rend ensuite à la cheminée; mais il y a cette différence, que la forme de la chaudière est celle d'un cylindre, et que souvent elle est terminée, non par deux fonds plats comme la chaudière-waggon, mais par deux calottes sphériques. *a* est la grille du foyer; *b*, b', b'' les conduits que suit la flamme pour se rendre à la cheminée, *c* le corps de la chaudière, et *h* le tube à vapeur.

Quelquefois ces chaudières sont *à tubes de retour* (*fig.* 15, *pl. II*), c'est-à-dire que la flamme, après avoir parcouru le dessous de la chaudière d'un bout à l'autre, est ramenée vers le foyer par un ou plusieurs tubes horizontaux *a*, qui sont plongés tout entiers dans l'eau de la chaudière. La flamme traverse donc l'eau dans toute sa longueur, et, après être revenue vers la bouche du foyer, elle se divise dans des carneaux latéraux, qui la reconduisent à la cheminée.

Il y a encore quelques autres combinaisons de ce système, mais il est inutile d'en donner le détail : elles reviennent aux précédentes.

Ce genre de chaudière n'est pas très-économique sous le rapport du combustible; mais il a l'avantage d'être le plus simple et celui qui est capable de la plus grande résistance. Il est employé dans les machines à haute pression et dans les machines d'Evans; on en fait usage aussi dans les bateaux à vapeur à haute pression.

3°. La *chaudière cylindrique à foyer intérieur* (*fig.* 18, *pl. III*) est formée d'un cylindre horizontal contenant l'eau à vaporiser, et dans lequel est placé un autre cylindre, ou tube d'un diamètre beaucoup moins considérable, destiné à contenir le feu. Ce tube intérieur traverse le premier dans toute sa longueur, en restant tout entier recouvert par l'eau, et à son extrémité antérieure, il est disposé pour recevoir

le combustible. A cet effet, cette portion est partagée en deux moitiés par une grille horizontale *c*, *c*, qui porte le combustible. Le demi-cylindre supérieur *d* sert de foyer; il est fermé en avant par une porte qu'on n'ouvre que pour recharger le feu. Le demi-cylindre inférieur *f*, au contraire, reçoit les cendres qui tombent au travers de la grille, et reste ouvert en avant, pour l'admission de l'air nécessaire à la combustion; mais, à l'endroit où finit la grille, il est intercepté par une cloison de briques. Au delà de ce point, le tube intérieur continue de suivre la chaudière jusqu'à son extrémité, où il aboutit aux carneaux. L'air, arrivant donc par dessous la grille, passe au travers du combustible, et la flamme qui s'en élève, en suivant le tube intérieur, traverse d'abord l'eau de la chaudière dans toute sa longueur; puis elle entre dans l'un des carneaux latéraux *g*, pour revenir vers la porte du foyer, passe devant la tête de la chaudière, et prend l'autre carneau *h*, qui la conduit définitivement à la cheminée.

Il arrive quelquefois que les chaudières à foyer intérieur sont à *tubes de retour*, c'est-à-dire que le tube intérieur se replie sur lui-même dans la capacité même de la chaudière, ou se subdivise en plusieurs tubes d'un moindre diamètre pour ramener la flamme près de la porte du foyer, d'où elle se distribue ensuite dans les carneaux qui la conduisent à la cheminée. Cette disposition se reconnait dans la *fig.* 19, *pl. III*; *a* est le foyer intérieur, et *b* le tube de retour.

Quelquefois les chaudières à foyer intérieur sont *à jambages*, c'est-à-dire que, dans la portion située au-dessus du foyer, elles ne présentent qu'un demi-cylindre prolongé par deux sortes de jambages latéraux descendant plus ou moins bas sur les deux côtés du feu, sans l'entourer complétement comme dans les chaudières précédentes. Cette disposition ne règne toutefois que dans la portion immédiatement placée au-dessus du foyer; au delà de ce point la flamme suit, comme auparavant, un tube intérieur qui la conduit aux carneaux, par lesquels elle revient d'abord vers le foyer, puis est conduite ensuite à la cheminée. Les *fig.* 16 et 17 et la *fig.* 20, *pl. III*, montrent l'arrangement de ces sortes de chaudières. Dans les *fig.* 16 et 17, *n*, *n* sont les jambages, *a* le foyer, *b* le tube intérieur; la flamme, au bout du tube *b*, entre dans le carneau de fond *c*, puis dans les carneaux *d* et *g*, et enfin passe en *e* sous la chaudière, pour se rendre à la cheminée.

D'autres fois encore, ce système de chaudière se combine avec celui que nous allons expliquer dans un instant, par l'introduction d'un tube bouilleur placé dans le milieu du foyer; cette disposition de chaudière à foyer intérieur, avec *tube bouilleur*, est représentée dans les *fig.* 21 et 22, *pl. III*. *a* est le foyer construit dans le tube intérieur, comme il a été expliqué plus haut; *b*, *b* est un bouilleur ou tube rempli d'eau, placé dans le milieu du tube intérieur, et communiquant, par deux petits tubes verticaux *c*, *d*, avec le bas et le haut de la chaudière, de sorte que l'eau du fond de la chaudière peut passer dans le bouilleur, et l'eau de celui-ci, ou la vapeur résultante, peut se réunir à la vapeur formée au sommet de la chaudière. La flamme, en

s'élevant du foyer, passe d'abord tout autour du bouilleur *b*, dans l'intervalle *e*, *e*; ensuite, une fois arrivée au bout de la chaudière, elle est reçue dans les carneaux latéraux *f*, *f*, qui la ramènent près de la porte du foyer; et alors, passant dans un dernier carneau *g*, *g*, construit sous la chaudière, cette flamme ou les gaz chauds qui en résultent parcourent tout le fond de la chaudière pour se rendre enfin dans un passage *h*, d'où ils s'échappent dans la cheminée; ce dernier passage contient lui-même un large tube dans lequel on fait stationner l'eau qui doit servir à l'alimentation, avant de la laisser pénétrer dans la chaudière. En outre, pour empêcher le refroidissement de la surface extérieure de la chaudière, on la recouvre en entier de cendres ou de sciure de bois sur une épaisseur considérable *k*. On voit que, dans cette disposition, la flamme parcourt d'abord l'intérieur de la chaudière, puis les deux côtés latéraux, puis enfin son fond; qu'en outre, dans son trajet, elle enveloppe un tube bouilleur qui fait lui-même partie de la chaudière; et enfin, qu'avant de pénétrer dans la cheminée, elle sert à échauffer l'eau d'alimentation.

Il y a encore quelques autres modifications du même mode de construction, mais elles ne s'écartent pas assez des dispositions précédentes pour exiger une explication spéciale.

Les chaudières cylindriques à foyer intérieur ont l'avantage de joindre une grande solidité à une économie considérable de combustible. Elles sont généralement employées pour les machines de Cornwall à double et à simple action. La dernière que nous avons décrite, avec tube bouilleur, a été construite aux mines de Fowey-Consols, en Angleterre, par deux des plus habiles ingénieurs du comté de Cornwall, MM. West et Petherick.

4°. La *chaudière à bouilleurs* est également de forme *cylindrique;* mais au lieu d'un tube contenant le foyer et placé dans la chaudière, il existe au contraire des tubes bouilleurs contenant de l'eau, et placés dans le milieu du foyer.

Les *fig.* 23 et 24, *pl. IV*, représentent une de ces chaudières. *a*, *a* sont deux tubes bouilleurs contenant l'eau à vaporiser, et communiquant avec le corps de la chaudière proprement dite *c* par deux tubes verticaux *b*, *b*. Quelquefois, au lieu de deux bouilleurs, il y en a trois et même davantage. Entre ces bouilleurs est bâtie une cloison horizontale ou voûte plate *d*, qui supporte elle-même un petit mur vertical s'élevant jusqu'au cylindre de la chaudière, de sorte que l'espace situé au-dessous du corps de la chaudière, et contenant les bouilleurs, se trouve divisé en trois compartimens *e*, *f*, *g*, qui servent de carneaux, comme on le verra dans un instant. Le foyer est placé sous les bouilleurs et à l'entrée du compartiment d'en bas *e*, la flamme, après avoir parcouru, le long du conduit *e*, le dessous des bouilleurs dans toute leur étendue, entre vers le bout de la chaudière dans le carneau *f*, revient ainsi vers la partie antérieure occupée par le foyer, et passant dans le conduit *h*, *h*, s'engage dans le carneau *g*, qui la conduit définitivement à la cheminée.

L'avantage particulier de ce système est de partager la chaudière en deux par-

ties, dont l'une seulement, savoir, les bouilleurs, est soumise à l'action directe du feu, et dont les réparations ou le remplacement sont faciles et peu dispendieux; tandis que l'autre partie, ou la chaudière proprement dite, se trouve séparée du foyer, et n'exige, par conséquent, que des réparations rares ou de peu d'importance. Les chaudières à bouilleurs sont d'ailleurs assez économiques sous le rapport du combustible. Ce système, tel que nous venons de l'expliquer, est employé généralement dans les machines de Woolf.

Quelquefois, on le modifie en augmentant considérablement le nombre des bouilleurs, qui deviennent ainsi la partie principale de la chaudière. Celle-ci est alors composée d'un nombre très-grand de bouilleurs d'un petit diamètre, réunis à leurs extrémités par de gros tubes transversaux, dans lesquels les bouilleurs prennent, d'une part, l'eau à vaporiser, et conduisent ensuite la vapeur après sa formation. Cet arrangement est, comme on le verra bientôt, analogue à celui qui est en usage dans les machines locomotives des chemins de fer; mais, dans les chaudières à bouilleurs, l'eau occupe l'intérieur des tubes, tandis que dans les chaudières des locomotives, c'est au contraire la flamme qui parcourt les tubes, et l'eau qui les entoure. Cette dernière disposition a cela d'avantageux que le feu, étant central, produit sa radiation sur une surface concave et enveloppante, ce qui donne à celle-ci un développement d'autant plus grand, et en outre, qu'en rapprochant les tubes les uns des autres, on peut diminuer autant qu'on veut la lame d'eau qui les sépare.

5°. La *chaudière locomotive ou à foyer multitubulaire* est représentée *fig.* 25 et 26, *pl. IV. a*, *a* est le foyer proprement dit, contenant le combustible, et entouré, de tous côtés, d'eau contenue dans l'intervalle *b*, *b*. La flamme, en s'élevant du combustible, pénètre dans les tubes *t*, *t*, et traverse ainsi toute la longueur de la chaudière, en ayant une surface de contact considérable avec l'eau qu'elle contient. Une fois parvenu en C, la flamme et les gaz chauds s'échappent librement dans la cheminée; mais la longueur des tubes, comparativement à la grandeur du foyer, fait que ces gaz ont déjà perdu une quantité considérable de leur calorique, de manière qu'ils ne font jamais rougir la cheminée près de sa base, comme cela se voyait constamment dans les anciennes locomotives, où l'on faisait usage de chaudières à foyer intérieur, avec un ou deux tubes de retour.

Les chaudières à foyer multitubulaire exigeraient des tubes beaucoup plus larges et moins nombreux, et, par conséquent, seraient beaucoup moins efficaces, si l'on s'y contentait du tirage naturel du feu; mais, dans les locomotives, on produit dans le foyer un tirage artificiel et forcé, en conduisant la vapeur perdue dans la cheminée, où elle se précipite en jets intermittents par un passage très-étroit. L'effet de ces jets de vapeur est de produire, au travers du feu, une aspiration d'air qui équivaut à l'action d'un soufflet ordinaire. On pourrait aussi remplacer cette disposition par un ventilateur.

Cette espèce de chaudière est principalement en usage pour les machines locomotives ; cependant on en voit quelques-unes appliquées à des machines à haute pression stationnaires. Elles sont peu économiques sous le rapport du combustible ou de l'entretien, mais ont l'avantage de produire une énorme quantité de vapeur, relativement à leur poids et à l'espace qu'elles occupent. C'est ce qui leur fait donner la préférence pour les locomotives.

6°. La *chaudière marine ou à chambres verticales* est représentée *fig.* 27 et 28, *pl. IV. a, a* est le foyer, qui est double et quelquefois triple pour chaque chaudière. *h* est la chambre à vapeur. La flamme, en s'élevant du combustible, passe successivement dans les conduits *b, c, d, e, f*, dont le dernier se termine par un tuyau montant *g*, qui conduit à la cheminée. Dans ce système, on voit que l'eau est soumise à l'action du feu dans des chambres très-étroites, de sorte que, dans un petit espace, la chaudière présente au contact de la flamme une surface de chauffe très-étendue. L'avantage de ces chaudières est donc d'occuper peu d'espace dans le navire, d'être faciles à réparer et de produire une vaporisation considérable, tout en étant cependant très économiques sous le rapport du combustible. Toutefois, ce système ne s'emploie que dans les bateaux à vapeur à basse pression. Pour les bateaux à haute pression, il ne présenterait pas une résistance suffisante, et, dans ce cas, on fait usage des chaudières cylindriques de diverses sortes, dont nous avons parlé déjà.

Outre les différentes espèces de chaudières dont nous venons de nous occuper, il y en a d'autres encore qui ont été proposées et exécutées par quelques constructeurs ; mais, comme elles n'ont point été adoptées généralement, nous ne croyons pas utile d'entrer ici dans plus de détails à cet égard. Ce que nous avons dit suffira pour compléter la description que nous donnerons plus loin des diverses machines à vapeur en usage.

Nous ajouterons seulement que chaque machine est toujours pourvue de deux chaudières, dont chacune est capable de suffire à l'exécution du travail, de sorte que celle qui repose peut être mise en réparations, s'il est nécessaire. Chacune de ces chaudières est, en outre, munie de tous ses accessoires indispensables, tels que nous allons les indiquer.

§ II. *Des accessoires de la chaudière, ou de l'appareil d'alimentation, des niveaux d'eau, du sifflet d'avertissement, de la soupape de sûreté, de la soupape renversée, et du registre de la cheminée.*

Nous venons de décrire les diverses dispositions employées pour appliquer la chaleur et produire la vapeur dans les chaudières des machines à vapeur. Il convient d'expliquer maintenant les divers appareils accessoires dont ces chaudières doivent être munies pour remplir convenablement leur but.

Le plus important de ces accessoires est l'*appareil d'alimentation*, qui est destiné à maintenir l'eau de la chaudière au même niveau, malgré les pertes qu'elle éprouve continuellement par suite de la vaporisation.

Cet appareil est différent selon que la machine est à basse ou à haute pression, parce que les machines à haute pression exigent l'emploi d'une pompe foulante pour faire pénétrer de force l'eau d'alimentation dans la chaudière, malgré la résistance produite par la force élastique de la vapeur; tandis que, dans les machines à basse pression, où la résistance de la vapeur est beaucoup moindre, il suffit de tenir le réservoir d'alimentation élevé de quelques pieds au-dessus de la chaudière, pour que le poids de la colonne d'eau ainsi formée surmonte la résistance offerte contre l'introduction de l'eau dans la chaudière.

L'*appareil d'alimentation pour les machines à basse pression* est représenté *fig.* 11 et 12, *pl. II.*

Il consiste en un tube en fer *l*, d'environ 8 à 10 pieds, fixé solidement à la paroi supérieure de la chaudière, et pénétrant, jusque près du fond, dans l'eau qu'elle contient. Au sommet de ce tube est placé un petit réservoir *k*, appelé *réservoir d'eau chaude* et alimenté par la machine elle-même. Ce réservoir reçoit par le tuyau *t*, l'eau provenant de la condensation de la vapeur, qui, en conséquence, est déjà très-chaude. Au fond du réservoir, mais sur le côté, pour laisser le milieu libre, est une ouverture conduisant dans le tube, mais fermée par une soupape *u* qui ne peut s'ouvrir qu'en dehors. Quand on soulève cette soupape, l'eau du réservoir coule aussitôt dans le tube, et pénètre dans la chaudière; mais, dès qu'aucune force extérieure ne soulève la soupape, elle retombe par son poids et par celui de l'eau du réservoir qui la recouvre, et elle ferme naturellement le passage de l'eau d'alimentation. D'autre part, un flotteur *m*, reposant sur la surface de l'eau dans la chaudière, et, par conséquent, montant et descendant avec elle, est suspendu à l'extrémité inférieure d'une tringle métallique; et la partie supérieure de celle-ci est attachée à un levier qui ouvre la soupape d'alimentation. Quand l'eau baisse dans la chaudière, le flotteur descend, tire la tringle et lève la soupape. L'alimentation commence donc aussitôt, et elle continue jusqu'à ce que l'eau de la chaudière ait repris un niveau assez élevé pour fermer de nouveau la soupape. Ainsi, on voit que la chaudière se remplit d'elle-même, et à mesure du besoin, sans que le machiniste ait autre chose à faire que de s'assurer de temps en temps que l'appareil fonctionne bien, ou que le niveau de l'eau se maintient convenablement. C'est ce qui a fait donner à cet appareil le nom d'appareil *à effet spontané.* Il y a, en outre, sur la figure, un flotteur placé dans le tuyau d'alimentation : il sert pour le registre de la cheminée, comme nous le dirons plus loin.

Dans les machines à basse pression, la force élastique de la vapeur dans la chaudière ne s'élève ordinairement qu'à deux ou trois livres, par pouce carré, au-dessus de la pression extérieure de l'atmosphère. Il s'ensuit que, pour faire pénétrer

de force l'eau d'alimentation dans la chaudière, il suffit, comme nous l'avons dit, de donner au tube d'alimentation une hauteur de 8 à 9 pieds, puisque la pression d'une colonne d'eau de 8 pieds équivaut au quart de la pression atmosphérique, ou à 4 livres environ par pouce carré. Mais, dans les machines à haute pression, où la vapeur a quelquefois une force élastique équivalent à plusieurs atmosphères, il faudrait donner au tube d'alimentation une hauteur beaucoup trop considérable pour que le poids seul de l'eau pût la faire pénétrer de force dans la chaudière, et c'est pourquoi l'on a dû recourir à l'emploi d'une pompe aspirante et foulante.

La *pompe d'alimentation des machines à haute pression* est représentée *fig.* 35, *pl. V.* *a* est le corps de pompe et *b* le plongeur solide, qui sert de piston à la pompe; *c* est le tuyau d'aspiration qui conduit au réservoir d'alimentation, et *d* est le tuyau de refoulement qui conduit à la chaudière; *e* est la soupape d'aspiration qui, lorsqu'elle s'élève, laisse pénétrer l'eau d'alimentation dans le corps de pompe; *f* est la soupape de refoulement qui, en se soulevant, laisse passer l'eau du corps de pompe dans la chaudière. Quand, par l'action de la machine, le plongeur monte, il fait le vide dans le corps de pompe; par conséquent, les soupapes sont pressées toutes deux vers l'intérieur du corps de pompe. Dans cette action, la soupape d'aspiration *e* se soulève par l'effet de la pression atmosphérique extérieure, et, au contraire, la soupape de refoulement *f* se ferme par la pression existant dans la chaudière. L'eau d'alimentation, aspirée par la pompe, monte donc alors dans le corps de pompe. Ensuite, quand le plongeur redescend, il refoule l'eau dans le tube *g* entre les deux soupapes, et, par conséquent, d'une part, la soupape *e* se referme par l'effet de cette compression, et, d'autre part, la soupape *f* se soulève et donne ainsi passage à l'eau qui se rend à la chaudière; *k* est un étrier à vis de pression, servant à ouvrir ou fermer la chapelle de la pompe, pour examiner la soupape. Il y a, en outre, le long du tuyau *c*, un robinet *i* qui sert à interrompre la communication entre le corps de pompe et le réservoir d'alimentation, quand on veut que la pompe cesse son effet; et il y a de même un robinet *h*, placé sur le tuyau de refoulement et près de la chaudière, qui empêche l'eau chaude de rentrer dans la chapelle de la pompe, pendant les interruptions du travail. Il est clair que, lorsqu'on veut suspendre l'effet de la pompe, il faut toujours fermer le robinet du tuyau d'aspiration avant celui du tuyau de refoulement, parce que, sans cela, l'action de la pompe sur l'eau ferait rompre les tuyaux ou les tiges.

La pompe d'alimentation est mise en jeu par la machine elle-même, et le nombre de ses courses est, par conséquent, réglé par celui des courses du piston de la machine. D'autre part, la capacité du corps de pompe est telle que, quand le plongeur parcourt, dans le corps de pompe, la moitié de sa course seulement, il suffit au besoin de la machine, c'est-à-dire qu'il fait passer dans la chaudière, à très-peu près, autant d'eau qu'elle en dépense; et que, quand il parcourt au contraire sa course entière, il remplit la chaudière très-promptement. D'après cette disposition, le plongeur est mis

en mouvement par la machine, mais au moyen d'un levier d'embrayage à deux encoches. Quand on embraye la pompe sur la première encoche, ou la plus rapprochée du pivot du levier, le plongeur ne parcourt que sa demi-course, et l'alimentation de la chaudière se soutient très-régulièrement, si la pompe fonctionne bien et si la vaporisation de la chaudière n'excède pas son taux ordinaire. Mais si la machine, en raison d'un excès de charge, dépense plus d'eau que de coutume, ou si l'on s'aperçoit que l'on a laissé trop baisser l'eau dans la chaudière, on peut remplir en peu de temps la chaudière, en embrayant la pompe sur la seconde encoche.

La pompe d'alimentation, que nous venons de décrire pour les machines à haute pression, ne fonctionne pas d'elle-même à mesure du besoin de la chaudière. Il y a bien divers appareils connus, au moyen desquels on peut régler l'alimentation, c'est-à-dire la mise en jeu de la pompe, par *effet spontané*, d'une manière analogue à celle que nous avons indiquée pour les machines à basse pression; mais, comme ces appareils sont sujets à se déranger et exigent souvent, sous ce rapport, plus d'attention que la manœuvre de la pompe elle-même, on y renonce le plus ordinairement, et le machiniste rétablit ou suspend le travail de la pompe, selon qu'il en reconnaît le besoin, en s'assurant fréquemment du niveau de l'eau dans la chaudière. Il existe, à cet effet, sur la chaudière, divers appareils que nous allons expliquer.

La hauteur d'eau dans la chaudière se reconnaît au moyen du niveau à flotteur, du niveau à tube de verre, des robinets de niveau, et enfin du sifflet d'avertissement.

Le *niveau à flotteur* consiste simplement en un flotteur qui repose sur l'eau de la chaudière, et qui, par conséquent, monte et descend avec elle. Ce flotteur est attaché à un fil métallique qui sort de la chaudière, en passant au travers d'une boite à étoupes, et qui se termine par une chaîne enroulée sur une poulie et portant à son autre bout un contre-poids. La poulie porte à sa circonférence deux fiches ou marques, qui ne sont sur le même niveau que quand l'eau de la chaudière est à la hauteur convenable. Mais si cette eau baisse, le flotteur descend, la poulie tourne, et la fiche placée du côté du flotteur baisse, tandis que la fiche opposée se relève. Cet appareil indique donc, par la dénivellation des deux fiches, la hauteur de l'eau dans la chaudière; mais, comme il est placé loin du machiniste, il n'est pas si commode que les suivans.

Le *niveau à tube de verre* (*fig. 4, pl. I*) est un tube de verre vertical *m n*, enchâssé à ses extrémités, supérieure et inférieure, dans deux douilles de métal *a*, *a*, communiquant avec l'intérieur de la chaudière par deux tubes horizontaux. Le tube supérieur pénètre dans la partie de la chaudière qui doit être constamment remplie de vapeur, et le tube inférieur, au contraire, dans la partie qui doit être remplie d'eau. La surface de cette eau doit donc toujours occuper un point intermédiaire de la longueur du tube. Ainsi, comme l'eau prend nécessairement son

niveau dans le tube de verre et dans la chaudière, on peut toujours reconnaître d'un seul coup d'œil quelle est la hauteur de l'eau dans la chaudière. Les deux passages horizontaux qui joignent le tube de verre à la chaudière portent chacun un robinet *r*, afin que si le tube de verre vient à se rompre, on puisse, en fermant ces robinets, s'opposer à la perte d'eau ou de vapeur qui en résulterait. Le petit robinet *s* sert à laisser au besoin écouler l'eau contenue dans le tube.

Les *robinets de niveau* sont moins commodes que le niveau à tube de verre, mais ils ne sont pas sujets aux mêmes chances de rupture, c'est pourquoi on les emploie toujours. Ce sont deux tubes *e*, *e* (*fig.* 11 et 12, *pl. II*), pénétrant dans la chaudière, l'un au-dessus, l'autre au-dessous du niveau que doit avoir l'eau, et terminés au dehors par deux robinets. D'après la position respective des deux robinets, en ouvrant celui d'en haut, il doit donner toujours de la vapeur, et en ouvrant celui d'en bas, il doit toujours donner de l'eau. Si tous deux donnent de la vapeur, c'est que le niveau de l'eau est trop bas, et si tous deux donnent de l'eau, c'est au contraire que le niveau de l'eau dans la chaudière est trop haut. On place souvent ces robinets tout près de la porte du fourneau et sous la main du machiniste.

Le *sifflet d'avertissement* est destiné à avertir le machiniste, dans le cas où il aurait négligé trop longtemps d'examiner les niveaux, et à lui faire connaître que l'eau a baissé au-dessous du point auquel elle doit être maintenue. C'est un tube étroit passant de l'intérieur de la chaudière au dehors, et terminé, à sa partie supérieure, par un sifflet ordinaire. Un petit flotteur, porté sur l'eau, ouvre l'orifice inférieur du tube quand l'eau est trop basse, et la vapeur, s'échappant alors par le sifflet, fait entendre un bruit aigu qui attire l'attention du machiniste. Ce petit appareil se construit de plusieurs façons, toutes trop simples pour exiger plus d'explications.

Les divers appareils que nous venons de décrire servent à faire connaître le niveau de l'eau dans la chaudière, et permettent d'éviter, par conséquent, les accidens auxquels pourrait être exposée la chaudière, si elle manquait d'une alimentation suffisante. En effet, si quelque portion de la chaudière, soumise extérieurement à l'action directe du foyer, se trouvait dégarnie d'eau à l'intérieur, elle pourrait devenir incandescente par l'effet de l'intensité du feu, et serait alors exposée à se briser, soit par l'excès de dilatation qu'elle éprouverait relativement aux parties voisines, soit par le changement instantané qu'elle subirait, et l'énorme quantité de vapeur qui se formerait tout-à-coup lorsque l'on ferait de nouveau passer de l'eau d'alimentation dans la chaudière. Ces appareils sont donc indispensables sous ce rapport; mais, comme il pourrait arriver aussi, même avec une alimentation soutenue, que la vapeur prît dans la chaudière, et à l'insu du machiniste, une pression beaucoup plus grande que celle à laquelle cette chaudière est capable de résister, il convient également d'avoir un appareil qui mette à l'abri de ce danger. Cet appareil est la soupape de sûreté.

La *soupape de sûreté* consiste en une ouverture circulaire percée au travers de la paroi supérieure de la chaudière, et fermée par un disque mobile, ou soupape proprement dite, portant un poids. Tant que la pression de la vapeur dans la chaudière est moindre que la pression de ce poids, le disque est maintenu sur l'ouverture, et celle-ci reste fermée; mais, dès que la pression dans la chaudière devient en excès, le disque est soulevé, et la vapeur s'échappe par l'ouverture. L'appareil ordinaire se compose d'un ajutage fixé sur la chaudière en *r*, *s* (*fig.* 36 et 37, *pl. V*), et à l'orifice duquel est ajusté un anneau qui forme le siége de la soupape *a*, c'est-à-dire sur lequel celle-ci se place et retombe lorsqu'elle bouche le passage. Le disque de la soupape est légèrement conique à sa partie inférieure, pour qu'il ferme plus hermétiquement l'ouverture, et risque moins de contracter adhérence avec son siége. En-dessous, il porte une queue *b*, qui glisse dans une douille fixée au siége ; de sorte que, quand la soupape est soulevée par l'action de la vapeur, comme on le voit dans la *fig.* 37, elle est maintenue par cette douille, dans la direction précise de l'axe de l'orifice, et lorsqu'elle retombe ensuite, elle rentre exactement dans son siége. Ordinairement, tout l'appareil est contenu dans un cylindre vertical *d*, qui porte un tuyau latéral *c*, pour l'écoulement de la vapeur qui s'échappe de l'orifice.

La pression qui tient la soupape fermée contre l'effort de la vapeur se produit de différentes manières. Quelquefois la soupape est surmontée d'une tige métallique, dans laquelle on enfile des anneaux pesans, comme on le voit représenté *fig.* 36. D'autres fois, on emploie une masse de métal pendant dans la chaudière, et suspendue à une chaîne fixée au-dessous de la soupape. Dans quelques cas, on se sert d'un ressort en hélice, enroulé autour de la tige, comme dans l'indicateur de Watt (*fig.* 8 et 9, *pl. I*), ou bien d'un ensemble de ressorts *en pincettes*, c'est-à-dire arc-boutés les uns contre les autres, et placés alors dans une boîte ovale, au lieu d'être cylindrique. Mais, comme ces appareils exigent toujours beaucoup de force pour ouvrir la soupape à la main et s'assurer qu'elle fonctionne bien, on leur préfère généralement un levier, et celui-ci est surtout nécessaire dans les machines à haute pression, parce que sans cela, il faudrait un poids trop considérable pour maintenir la soupape fermée.

On voit une soupape *à levier* représentée en *f* (*fig.* 11, *pl. II*). *i* est la tige verticale qui presse sur la soupape pour la tenir fermée. *p* est un point fixe, autour duquel le levier *pg* peut se mouvoir, en jouant dans une fourchette *h*, laquelle est fermée en haut par une petite cheville, pour empêcher que le levier ne puisse être rejeté en dehors. Celui-ci, vers son extrémité, porte un poids *g* qui, par l'entremise de la tige *i*, exerce sur la soupape la pression requise. Il est clair qu'en éloignant plus ou moins ce poids, le long du levier, qui est gradué, on peut augmenter ou diminuer à son gré la pression de la soupape; et comme on connaît la valeur du poids *g*, ainsi que l'aire de l'ouverture sur laquelle il se répartit, on peut toujours régler la résistance de la soupape par unité de surface, ou la pression de la vapeur dans la chaudière, au degré que l'on juge convenable.

Les soupapes à levier se font quelquefois *à ressort*, comme on en voit une représentée *fig.* 2 et 3, *pl. I.* C est le point fixe du levier, S la tige verticale qui ferme la soupape, et CB le levier de pression; à l'extrémité de celui-ci est placée une balance à ressort ordinaire LP, dont le pied P est fixé à la chaudière. En serrant l'écrou mobile B, le ressort de la balance se comprime et produit des pressions équivalentes à des poids d'autant plus considérables, lesquels exercent ensuite, sur le point S, des efforts augmentés dans la proportion des deux bras du levier BC et AC. Lorsqu'on fait usage des soupapes à levier, il faut, pour avoir la pression exercée sur la soupape, non-seulement avoir égard à la longueur des bras de levier BC et AC, ainsi qu'au diamètre exact de l'ouverture de la soupape, mais il faut encore tenir compte de la pression produite sur le point S, par le poids du levier lui-même, augmenté du poids de l'écrou et de la partie supérieure de la balance, comme nous l'avons montré dans notre *Traité des Locomotives*, chap. III.

Les soupapes de sûreté ont pour but d'empêcher que la vapeur ne s'élève à une pression dangereuse; mais, pour mettre les chaudières, autant que possible, à l'abri des explosions produites par cette cause, on les munit, de plus, de ce qu'on appelle *rondelles fusibles*. Ce sont des plaques formées d'une composition métallique très-fusible, et qu'on fixe sur une des tubulures de la chaudière, en les recouvrant d'une toile métallique et les maintenant par une bride en fer. Si la vapeur atteint dans la chaudière une certaine pression, et, par conséquent, une certaine température, elle fond la rondelle et s'écoule au-dehors.

Outre la soupape de sûreté, il y a encore, sur les chaudières, ce qu'on nomme la *soupape renversée;* elle est représentée en *s* (*fig.* 11, *pl. II*). C'est une soupape qui ne peut s'ouvrir que du dehors au dedans. Dans l'état ordinaire, elle est fermée par la pression intérieure de la vapeur, et par un contrepoids qui ne doit pas être très-pesant; mais, s'il arrive que l'on suspende le travail, et que la vapeur se refroidisse ou se condense dans la chaudière, cette soupape cède alors à la pression de l'atmosphère, et laisse rentrer l'air dans la chaudière. Cette précaution est nécessaire dans les chaudières à basse pression, parce que, n'étant calculées que pour résister à la différence de pression entre la pression de la vapeur et celle de l'atmosphère, différence qui n'est ordinairement que d'environ un quart d'atmosphère, ces chaudières pourraient être écrasées si elles se trouvaient, par l'effet de la condensation intérieure de la vapeur, exposées à supporter la pression entière de l'atmosphère.

Enfin, le *registre de la cheminée* ou *modérateur du feu* est une plaque mobile qui, à mesure qu'on la baisse, intercepte de plus en plus le passage qui conduit du foyer à la cheminée, et permet, par conséquent, de régler le tirage du feu. En effet, si le feu est trop actif pour le besoin du travail de la machine, il suffit de baisser le registre pour arrêter la fumée dans le foyer et les carneaux, et modérer, par conséquent, l'arrivée de l'air extérieur nécessaire à l'activité de la combustion. Le registre est formé d'une plaque de tôle ou de fonte glissant dans deux rainures ver-

ticales; on le manœuvre à la main, au moyen d'une chaine où d'un levier; et, de peur que son poids ne rende cette manœuvre trop difficile, on lui donne un contrepoids formé d'une masse de métal suspendue à l'extrémité d'une chaine passant sur une poulie de renvoi. Cet appareil sert encore, quand on le ferme tout-à-fait, à conserver la chaleur du foyer et de la chaudière, pendant la nuit ou les autres interruptions ordinaires du travail.

Quelquefois ce registre est à *effet spontané*, c'est-à-dire qu'on le dispose de telle sorte qu'il agisse de lui-même et en proportion du besoin, sans exiger aucune attention du machiniste. A cet effet, un tube vertical *l* (*fig.* 11 et 12, *pl. II*), ouvert à ses deux extrémités, est fixé à la paroi supérieure de la chaudière. Ce tube pénètre dans la chaudière jusqu'au-dessous du niveau de l'eau, et son extrémité supérieure est ouverte à l'air extérieur. L'eau de la chaudière, pressée par la force élastique de la vapeur, s'élève donc dans le tube jusqu'à ce que le poids de l'eau ainsi soulevée fasse équilibre à l'excès de la pression dans la chaudière, sur la pression atmosphérique. D'autre part, un flotteur *o*, porté sur la surface de l'eau du tube, est lié au registre *r* par une chaine *q*, *q*, passant sur des poulies de renvoi. Quand la vapeur s'accumule dans la chaudière, sa pression, en augmentant, soulève davantage le flotteur, et, par conséquent, baisse le registre. L'inverse a lieu dans le cas contraire. Cette disposition facilite donc la régularité de la vaporisation, en réglant spontanément le tirage du feu; mais elle ne s'applique pas aux machines à haute pression, parce que l'élévation de l'eau dans le tube devrait alors être trop considérable. Dans ce cas, on a imaginé quelques autres appareils pour y suppléer, mais on les trouve en général d'un effet incertain, et l'on se contente le plus souvent de manœuvrer le registre à la main. Dans les machines à basse pression, on place ordinairement le flotteur du registre dans le tube d'alimentation de la chaudière, ce qui se fait sans difficulté, en établissant la soupape d'alimentation *u*, non pas au milieu même du réservoir d'alimentation, mais un peu sur le côté, et en faisant traverser en outre le réservoir par un petit tuyau vertical, qui permet à la chaine du flotteur de descendre dans le milieu du tube d'alimentation, sans y faire tomber l'eau du réservoir. Cette disposition se reconnait sur la *fig.* 11, *pl. II*.

§ III. *Des régulateurs, robinets, tiroirs et soupapes à vapeur.*

Après avoir, dans les paragraphes précédens, décrit les appareils destinés à produire la vapeur, il convient de passer à ceux qui servent à la distribuer dans le cylindre, soit au-dessus, soit au-dessous du piston, pour produire le mouvement. C'est au moyen des régulateurs, robinets, tiroirs et soupapes à vapeur, que l'on effectue cette distribution de la vapeur dans les machines. Parmi les différentes dispositions de ces appareils, nous nous bornerons à indiquer celles qui sont le plus en usage; les figures de machines que nous donnerons plus loin serviront à compléter ce que cette première explication pourrait laisser à désirer.

Le *régulateur* consiste en deux disques concentriques, appliqués l'un sur l'autre, et percés chacun d'une ouverture correspondante au passage de la vapeur. L'un de ces disques est fixe, et l'autre est mobile sur son centre, au moyen d'un carré et d'une poignée. En tournant la poignée dans un sens, on peut amener les deux ouvertures des disques l'une en face de l'autre, et, par conséquent, la vapeur traverse librement le passage; mais, en tournant la poignée en sens inverse, on amène au contraire la partie pleine du disque mobile sur l'ouverture du disque fixe, et, par conséquent alors, le passage se trouve intercepté. La pression de la vapeur, qui tend à sortir de la chaudière, maintient d'ailleurs les deux disques en contact parfait l'un avec l'autre, et s'oppose, par conséquent, à toute fuite de vapeur, quand le régulateur est fermé. Quelquefois, au lieu de deux disques, on emploie deux secteurs, et alors celui qui est fixe est le seul qui soit percé d'une ouverture; le secteur mobile est formé d'une plaque pleine. Quand cette plaque se trouve en face de l'ouverture du secteur fixe, elle intercepte le passage de la vapeur, sinon le passage est ouvert. Les *fig.* 55 et 56, *pl. VIII*, représentent cette disposition. AB est le secteur fixe; *aa'bb'*, son ouverture; *dd* est le secteur plein qui ouvre ou ferme le passage de la vapeur; *cc* est le pivot autour duquel s'exécute le mouvement, et enfin *p* est la poignée qui sert à ouvrir ou fermer le régulateur. Cette poignée est d'ailleurs mise en mouvement par la machine elle-même. Le régulateur n'est guère en usage, pour distribuer la vapeur, que dans les machines atmosphériques.

Le *robinet à quatre voies* (*fig.* 29, 30 et 31, *pl. V*) est un moyen très-simple de produire alternativement l'admission et la sortie de la vapeur de chaque côté du piston. Il consiste en un robinet percé de deux passages 1, 2 et 3, 4, contournés à angle droit sur eux-mêmes, comme on le voit dans la *fig.* 30. Ce robinet est mobile sur son axe, au moyen d'une poignée *h*, qui est mise en jeu par la machine; et, selon la direction dans laquelle cette poignée est tournée, une communication s'établit, d'une part, entre la chaudière et l'une des faces du piston, et, de l'autre part, entre la face opposée du piston et le tuyau d'éduction ou de sortie de la vapeur. Dans les *fig.* 29, 30 et 31, S représente le tube à vapeur, et *e* le tuyau d'éduction; *a* et *b* sont les ports de la vapeur au-dessus et au-dessous du piston. Quand le robinet est tourné comme il est indiqué dans les *fig.* 29 et 30, on voit que le passage 1, 2 du robinet établit une communication entre le tuyau à vapeur S et le tube *b'* qui conduit sous le piston; tandis que le passage 3, 4 ouvre la communication du dessus du piston au tuyau d'éduction *e* de la vapeur. Dans la *fig.* 31, au contraire, le robinet est supposé avoir fait un quart de révolution; et alors le passage 4, 3 établit une communication entre le tuyau à vapeur S et le port *a* qui mène au-dessus du piston, tandis que le passage 1, 2 conduit alors du tube *b'* au tuyau de sortie *e* de la vapeur.

On voit que ce mode de distribution de la vapeur est très-simple; mais il a l'inconvénient de ne permettre que des passages très-étroits pour la vapeur, à moins qu'on ne veuille donner au robinet des dimensions considérables, qui lui ôteraient

en partie ses avantages. En outre, le robinet s'use dans le mouvement et devient sujet à des pertes de vapeur. Aussi, ce mode n'est guère en usage que dans les machines à haute pression de petites dimensions, parce qu'alors c'est surtout la simplicité et la légèreté que l'on recherche.

Les *tiroirs* sont des pièces contenues dans un compartiment appelé boîte à vapeur, et qui, selon qu'on les fait mouvoir dans cette boîte, établissent alternativement une communication entre la chaudière et chacune des deux faces du piston. Les *fig.* 32 et 33, *pl. V*, représentent l'une de ces dispositions le plus en usage. S est le tube à vapeur, *e* le tuyau d'éduction de la vapeur, et *a* et *b* les deux ports du cylindre au-dessus et au-dessous du piston. *mnop* représente la boîte à vapeur, et la pièce concave *x* est le tiroir. Celui-ci est tiré et poussé alternativement par le moyen de sa tige *t*, qui est mise en mouvement par la machine. La boîte à vapeur est fermée hermétiquement de tous côtés, et, pour que la vapeur ne puisse s'échapper autour de la tige du tiroir, celle-ci traverse une boîte à étoupes, semblable à celle du piston à vapeur. Le tiroir, à mesure qu'il est poussé ou tiré par la tige *t*, glisse le long de la face *n p*, qui est parfaitement polie, et il reste complétement en contact avec elle, parce qu'il est pressé contre elle par la force élastique de la vapeur arrivant de la chaudière par le tuyau S. On voit que, dans ce mouvement de va et vient, le tiroir passe alternativement de la position *x*, représentée sur la *fig.* 33, à la position *x'* indiquée sur la *fig.* 32. Dans le premier cas, la vapeur, arrivant par le tuyau S, suit le passage *b*, arrive sous le piston et lui fait exécuter sa course montante; tandis que dans le même instant la vapeur située au-dessus du piston, et qui a servi à exécuter la course précédente, suit le passage *a* et s'échappe par le tuyau d'éduction *e*, qui la conduit au dehors, c'est-à-dire, soit au condenseur, soit à l'air extérieur, selon le système de la machine. Quand, au contraire, le tiroir occupe la position de la *fig.* 32, on voit que la vapeur de la chaudière passe au tuyau S dans le conduit *a*, vient agir au-dessus du piston et lui fait exécuter sa course descendante, tandis que la vapeur inutile s'échappe de dessous le piston par le conduit *b* et le tuyau de sortie *e*, qui la conduit à l'extérieur. Ce système effectue donc très-simplement la distribution de la vapeur, mais il ne convient guère aux grandes machines, parce que la vapeur qui se perd par le remplissage inutile des passages *a* et *b*, nuit à l'économie, que l'on recherche surtout dans leur emploi.

Le *tiroir long* ou *tiroir en* D, auquel on donne ce nom à cause de sa ressemblance avec la lettre D, est représenté sur les *fig.* 40, 41 et 42, *pl. VI*. Il a l'avantage de conduire la vapeur jusqu'à l'entrée même des ports du cylindre, et, par conséquent, de faire éviter la perte de vapeur qui, dans la disposition précédente, se produit à chaque coup de piston, par le remplissage inutile des deux tuyaux qui conduisent du tiroir aux ports *a* et *b* du cylindre. Dans la figure, S représente le tuyau d'apport de la vapeur, et *e* le tuyau d'éduction. La boîte à vapeur *mnop* est hermétiquement fermée de toutes parts, et la tige *t* du tiroir y pénètre en traversant une boîte à étoupes.

Le tiroir, représenté séparément en *digh*, dans la *fig.* 40, est à peu près semblable au tiroir ordinaire, mais il est plus long et surmonté, dans toute sa longueur, d'un tube demi-cylindrique *cdfg*, ouvert à ses deux extrémités pour le libre passage de la vapeur, comme on le verra dans un instant. La boîte à vapeur est elle-même semi-cylindrique comme le tiroir, de manière que celui-ci y glisse à frottement doux au moyen de l'étoupage *k*, *k*, qui appuie contre la face interne ou cylindrique de la boîte à vapeur, et maintient, par conséquent, la face plane du tiroir en contact immédiat avec la face plane *np* de la boîte à vapeur. Cet arrangement a pour but d'éviter la pression considérable qu'éprouveraient ces deux faces planes l'une contre l'autre, si la vapeur de la chaudière pressait en plein sur le sommet du tiroir, comme cela a lieu dans la disposition précédente. La construction du tiroir long étant comprise, l'inspection seule des figures suffit pour en faire connaître le jeu. Quand le tiroir est dans la position de la *fig.* 42, la vapeur de la chaudière passe du tuyau S au port inférieur *b* du cylindre, et produit la course montante du piston; tandis que la vapeur inutile s'échappe de dessus le piston par le port *a*, en suivant le tuyau du tiroir et le tube d'éduction *e*, qui la conduit au dehors ou au condenseur. Dans la position de la *fig.* 41, au contraire, la vapeur de la chaudière passe de S en *a*, au-dessus du piston, et la vapeur inutile passe de *b* en *e*, au condenseur ou au dehors de la machine.

Comme ce tiroir a un poids assez considérable, et que la machine devrait employer, en conséquence, beaucoup plus de force pour le faire remonter que pour le faire descendre, on fait communiquer sa tige avec un axe d'où part un petit levier portant un contre-poids capable de contre-balancer le poids du tiroir. Par ce moyen, il devient aussi facile de tirer le tiroir dans un sens que dans l'autre, et la machine n'a plus qu'un frottement à surmonter pour le mouvoir dans les deux sens. Cette disposition est adoptée de même pour les autres espèces de tiroirs, lorsqu'ils ont un poids suffisant pour en rendre l'emploi nécessaire.

La *fig.* 46, *pl. VI*, représente un tiroir du même genre que le précédent, mais qui offre cependant avec lui quelques différences de construction. C est le cylindre de la machine, S l'orifice du tube qui amène la vapeur de la chaudière, et *mnop* la boite à vapeur. Le tiroir consiste en un tuyau plat *a'b'*, que la figure ne laisse voir que de profil, mais qui, dans l'autre sens, est beaucoup plus large. Ce tuyau porte à ses deux extrémités deux courts ajutages *a'*, *b'*, dont les orifices se présentent en face des ports supérieur et inférieur du cylindre. Un ressort *d*, *d*, qui joue dans une rainure sur le dos du tiroir, presse celui-ci contre la face de glissement *np*, qui est garnie d'une lame de métal poli. Cette face *np* présente trois ouvertures: une en haut, qui est l'entrée du port supérieur *a* du cylindre; une seconde, qui est celle du port inférieur *b*; et enfin une troisième, qui conduit au tube d'éduction *e*. La vapeur de la chaudière arrive par le tube S et remplit entièrement la boite à vapeur *mnop*, mais ne peut jamais pénétrer dans l'intérieur du tiroir, qui ne sert

que pour conduire la vapeur inutile du cylindre au tube d'éduction. Lorsque le tiroir est dans la position représentée sur la figure, la vapeur passe de la boite à vapeur dans la partie supérieure du cylindre par le port *a*, et la vapeur inutile sort de dessous le piston par le port *b*, se répand dans le tiroir, et enfin s'échappe par le tuyau d'éduction *e*. Le piston exécute donc sa course descendante. Lorsque le tiroir est, au contraire, baissé de manière que l'ajutage *a'* se trouve juste en face de l'entrée du port supérieur *a*, la vapeur alors située au-dessus du piston sort du cylindre par le passage *a*, suit le tiroir dans toute sa longueur et s'écoule par le tuyau d'éduction *e*; tandis que la descente du tiroir ayant placé le passage *b* en dehors de l'ajutage *b'*, la vapeur de la chaudière pénètre dans le cylindre par le conduit *b* et fait remonter le piston. On voit donc que, selon la position du tiroir, le piston de la machine exécute sa course montante ou sa course descendante.

Le *tiroir cylindrique* est encore une disposition du même genre que les précédentes. La boite à vapeur *mnop* (*fig.* 43, *pl. VI*) consiste en un cylindre exactement alésé vers ses deux extrémités, et deux petits pistons *c* et *d*, montés sur une même tige *t*, y font l'office de tiroirs. D'un seul coup d'œil, on voit que quand la tige *t* pousse le tiroir dans la position où il est représenté sur la figure, la vapeur de la chaudière passe du tube à vapeur S dans le port *b*, et fait remonter le piston dans le cylindre, tandis que la vapeur qui a servi à exécuter la course précédente s'échappe par le port *a* et le tuyau d'éduction *e'*, qui la conduit au dehors. Le contraire a lieu quand la tige du tiroir, en remontant, place le piston *c* au-dessus du port *a*, et le piston *d* au-dessus du port *b*. Dans ce cas, la vapeur de la chaudière pénètre au-dessus du piston par le port *a*, et la vapeur inutile s'échappe par le port *b* et le tuyau d'éduction *e''*.

Les différens appareils que nous venons de décrire peuvent être disposés ou modifiés de manière à permettre l'usage de la détente de la vapeur dans la machine, c'est-à-dire de manière à intercepter l'arrivée de la vapeur de la chaudière, avant d'intercepter la sortie de la vapeur inutile du côté opposé, ou avant que le piston ne soit arrivé à la fin de sa course dans le cylindre. Mais un moyen, qui s'applique à tous les cas, consiste à intercepter directement la vapeur dans le tube à vapeur lui-même, ou à son entrée dans la boite à vapeur, en se servant pour cela d'un tiroir accessoire, d'un robinet ou d'une soupape; de sorte que, quoique le tiroir principal continue de tenir les passages ouverts, il n'arrive cependant plus de vapeur dans le cylindre, parce que le tube à vapeur n'en fournit plus. Par ce moyen on peut intercepter l'arrivée de la vapeur en un point quelconque de la course du piston, et par conséquent faire varier à son gré la détente de la vapeur, en serrant plus ou moins quelques écrous et sans arrêter le travail de la machine.

Les *tiroirs plats* sont également très en usage. Ils se distinguent des dispositions précédentes par la simplicité de leur construction et par la facilité avec laquelle ils permettent la détente de la vapeur en un point quelconque de la course du piston. Ce système, représenté dans la *fig.* 53, *pl. VIII*, consiste en quatre tiroirs, deux

pour l'admission de la vapeur dans le cylindre, et deux pour sa sortie. Chacun de ces tiroirs est placé sur une ouverture qui lui est propre; de sorte que le cylindre porte quatre ouvertures ou ports 1, 2, 3, 4. La vapeur arrive de la chaudière par le tube S, et elle se répand dans le tuyau d'admission A. Au sommet de celui-ci est le port 1 qui, lorsqu'il est découvert, laisse pénétrer la vapeur au-dessus du piston, et au bas du même tuyau est le port 2 qui, en s'ouvrant, admet la vapeur sous le piston. Du côté opposé du cylindre sont deux autres ports, 3 et 4, tous deux conduisant au tube d'éduction E, le premier servant à la sortie de la vapeur située au-dessus du piston, le second servant, au contraire, à la sortie de la vapeur située au-dessous. Sur chacune de ces ouvertures existe une plaque de métal ou tiroir *m*, *n*, *p*, *q*, qui glisse à frottement doux sur une semelle parfaitement polie et placée du côté opposé à l'arrivée de la vapeur. Quand ces tiroirs recouvrent les ouvertures du cylindre, ils sont pressés contre cette semelle par la force élastique de la vapeur, et, par conséquent, tiennent le passage hermétiquement fermé; mais en se relevant ou en s'abaissant, ils découvrent le passage et permettent l'admission ou la sortie de la vapeur. Les deux tiroirs d'admission sont, pour plus de simplicité, montés sur un même chariot, ainsi que les deux tiroirs d'éduction, et ces deux chariots peuvent être mus par le même excentrique ou par deux excentriques différens. Dans la figure, tous les tiroirs recouvrent les ports de la vapeur; mais si l'on suppose que l'excentrique, en agissant sur les leviers *l* et *l'*, baisse le chariot *aa* des tiroirs d'admission et soulève celui *ee* des tiroirs d'éduction, on reconnaîtra que par ce mouvement le port d'admission supérieur 1 sera ouvert, tandis que le port inférieur 2 continuera d'être fermé. La vapeur pénétrera donc alors au-dessus du piston. En même temps, puisque nous avons dit que le chariot des tiroirs d'éduction est soulevé, on voit que le port d'éduction inférieur 4 sera découvert par son tiroir, tandis que le port supérieur 3 continuera d'être fermé. La vapeur pourra donc sortir de dessous le piston par le port 4, tandis qu'elle pénètre en dessus par le port 1, et par conséquent le piston exécutera sa course descendante. Dans l'instant suivant, les chariots subiront un mouvement inverse, et par conséquent le port inférieur d'admission se trouvera ouvert, ainsi que le port supérieur d'éduction, et le piston remontera dans le cylindre.

On comprend qu'en fixant convenablement les tiroirs d'admission sur l'excentrique, on peut fermer les passages en un point quelconque de la course du piston, et, par conséquent, donner à la vapeur le degré de détente que l'on veut. Cependant quelquefois, pour donner la facilité de faire immédiatement travailler la machine avec ou sans détente, on fixe les deux tiroirs *m*, *n* pour le travail sans détente, et on ajoute ensuite deux autres tiroirs plats qui sont placés entre les tiroirs *m*, *n* et le cylindre, et qui sont fixés sur leur excentrique de manière à produire la détente voulue. Alors si l'on veut faire marcher la machine sans détente, il n'y a qu'à désembrayer les deux tiroirs additionnels; et si l'on veut, au contraire, employer la détente, il suffit de les embrayer de nouveau; car, quoique les deux tiroirs originaux *m*, *n*

continuent alors de tenir les passages ouverts pendant toute la course, les tiroirs additionnels, en tombant au moment convenable, interceptent la vapeur de manière à obtenir les effets désirés. Chacun de ces divers tiroirs est d'ailleurs tenu fermé par un ressort qui, lorsque la machine est arrêtée, remplace l'action de la vapeur, et quelquefois, au lieu d'être des plaques pleines, ces tiroirs sont des plaques percées d'une ouverture au travers de laquelle passe alors la vapeur.

Les *soupapes à vapeur*, dont nous allons nous occuper maintenant, sont des appareils moins simples que les précédens, mais d'un effet plus certain, et, par conséquent, plus convenable aux très-grandes machines; c'est pourquoi on leur donne alors la préférence. On emploie pour la distribution de la vapeur les soupapes coniques ou les soupapes à double siége.

Les *soupapes à vapeur coniques* (*fig. 44*, *pl. VI*) sont des soupapes coniques ordinaires, semblables à celles que nous avons décrites en parlant des soupapes de sûreté, et qui, en se soulevant les unes après les autres, dans l'instant convenable, permettent alternativement l'entrée et la sortie de la vapeur sur chacune des deux faces du piston. Comme à chaque extrémité du cylindre d'une machine à double action, il y a deux effets à produire, savoir, l'introduction et la sortie de la vapeur, il s'ensuit que, dans ces machines, il faut, pour le haut du cylindre, deux soupapes que l'on dispose ensemble dans une boîte à vapeur supérieure, et pour le bas du cylindre, deux autres soupapes que l'on réunit également dans une boîte à vapeur inférieure. Dans les machines à simple action, qui ne reçoivent la vapeur de la chaudière que sur une des faces du piston, mais dans lesquelles il faut laisser ensuite cette vapeur passer d'une extrémité à l'autre du cylindre, il suffit de trois soupapes : deux pour laisser entrer et sortir la vapeur, et l'autre pour établir la circulation de cette vapeur après qu'elle a terminé son effet d'un côté du piston.

Les soupapes coniques sont formées d'un disque légèrement conique à son bord inférieur, et reposant sur un siége d'une forme pareille, parfaitement dressé et poli à cet effet. Pour qu'elles retombent bien exactement en place, elles sont munies en dessous d'une queue qui glisse dans une douille fixe placée sous le siége, et qui est représentée sur la figure par sa section centrale. Quand la soupape pose sur son siége, contre lequel elle est pressée par la force élastique de la vapeur, elle bouche entièrement le passage et arrête la vapeur ; mais dès qu'elle est soulevée par l'intermédiaire de la machine ou par le moyen des leviers à manche que dirige le machiniste, elle ouvre une issue qui permet à la vapeur de s'écouler librement. C'est ce qu'on reconnaît facilement à l'inspection de la *fig. 44*, qui représente un appareil de soupapes à vapeur coniques, pour une machine à double action. La soupape supérieure de la boîte à vapeur d'en haut, et la soupape inférieure de la boîte à vapeur d'en bas, sont toutes deux ouvertes. Les deux autres soupapes sont, au contraire, fermées.

Pour que la vapeur puisse être successivement amenée de la chaudière au cylindre, et conduite ensuite du cylindre au condenseur ou au dehors de la machine, chacune des deux boîtes à vapeur est composée de trois compartimens 1, 2, 3, séparés entre eux par des cloisons percées pour recevoir les soupapes. Les compartimens d'en haut, 1, 1, sont en libre communication avec le tube à vapeur SS, et se trouvent, par conséquent, toujours remplis de vapeur. Les compartimens d'en bas, 3, 3, sont en communication avec le dehors, ou avec le condenseur, par le moyen du tuyau d'éduction *e*, et, par conséquent, ces compartimens sont constamment occupés par la vapeur imparfaitement condensée. Enfin les compartimens du milieu, 2, 2, ne sont autre chose que ce qu'on appelle les *ports* du cylindre, c'est-à-dire les ouvertures qui conduisent à l'intérieur du cylindre. Il résulte de cette disposition que, lorsqu'on ouvre la soupape placée entre les compartimens 1 et 2, qu'on appelle la *soupape d'admission*, la vapeur passe du tuyau S, c'est-à-dire de la chaudière, au cylindre ; et que, lorsqu'on ouvre la soupape placée entre les compartimens 2 et 3, qu'on nomme la *soupape d'éduction*, la vapeur passe de l'intérieur du cylindre au tuyau *e*, qui la conduit au condenseur. Ces effets se passent dans chacune des deux boîtes à vapeur, comme on le reconnaît aisément à l'inspection de la figure. Pour que le jeu de la machine soit complet, il suffit donc de régler le mouvement des soupapes, de telle sorte que la soupape d'admission d'en haut et la soupape d'éduction d'en bas soient ouvertes en même temps, et qu'ensuite la soupape d'admission d'en bas et la soupape d'éduction d'en haut soient ouvertes à leur tour. En effet, dans le premier cas, par exemple, qui est celui représenté sur la figure, on voit que la vapeur de la chaudière passe du tuyau S dans le port *a* du cylindre et vient agir au-dessus du piston pour lui faire exécuter sa course descendante; tandis que la vapeur située au-dessous, et qui a servi à effectuer la course précédente, s'écoule par le port *b* dans le tube d'éduction, qui la conduit au condenseur. Afin que cette action des soupapes correspondantes s'effectue avec simplicité et bien simultanément, la soupape à vapeur d'en haut et la soupape d'éduction d'en bas sont montées sur une seule tringle *oo*, qui les fait mouvoir toutes deux en même temps, et la même chose a lieu pour les deux autres soupapes.

Enfin. pour que l'abaissement ou le soulèvement des soupapes supérieures de chaque boîte ne s'oppose au mouvement contraire que doivent avoir les soupapes inférieures, on adopte souvent la disposition suivante : la tige des premières est formée d'un petit tube que traverse la tige des secondes, et le mouvement des deux tiges l'une dans l'autre s'exécute au moyen d'une garniture de filasse formant une petite boîte à étoupes. C'est ce que la *fig.* 44 fera comprendre parfaitement. On désigne ordinairement cette disposition par le nom de *soupapes enfilées*. C'est un arrangement fort simple; mais il exige beaucoup d'exactitude dans l'exécution, pour que toutes les soupapes soient parfaitement centrées, et, par conséquent, retombent bien exactement sur leur siége, sans permettre aucune fuite de vapeur.

Nous indiquerons plus loin les moyens le plus en usage pour faire mouvoir les tiges verticales *o* et *o'* qui ouvrent et ferment les soupapes; mais, dans le mode adopté *fig.* 44, le jeu alternatif de ces tiges est exécuté par le moyen de deux lunettes *h*, *i*, poussées en haut et en bas par deux petits excentriques intérieurs fixés en sens contraire sur l'axe *k*. Celui-ci tourne d'ailleurs sur lui-même par l'effet de la roue d'angle *l*, qui est mue par la machine.

La *fig.* 45, *pl. VI*, représente un appareil de soupapes coniques analogue au précédent, mais pour une machine à simple action. S est le tube à vapeur communiquant avec la chaudière, et *e* le tube d'éduction conduisant au condenseur. Les deux soupapes 1 et 3, savoir : la soupape d'admission et la soupape d'éduction, se meuvent en même temps, au moyen d'une tringle qui réunit leurs tiges *t* et *t'*. La soupape 2, qui est la soupape d'*équilibre*, est au contraire fermée quand les deux autres sont ouvertes. Si donc on suppose que les soupapes 1 et 3 sont ouvertes, et la soupape 2 fermée, la vapeur de la chaudière pénètre, par le port *a*, dans le cylindre, au-dessus du piston, et lui fait exécuter sa course descendante; tandis que la vapeur, restant sous le piston, s'échappe par le port *b* et la soupape 3, dans le tube d'éduction *e*, d'où elle se rend au condenseur. Quand le piston est parvenu au bas du cylindre, les deux soupapes 1 et 3 se ferment, et la soupape 2 s'ouvre, comme on le voit sur la figure. Alors la vapeur cesse d'arriver de la chaudière ou de s'échapper dans le condenseur. Mais, comme la soupape 2 est ouverte, la vapeur se répand également des deux côtés du piston, de sorte que celui-ci se trouve en équilibre dans la vapeur, ou pressé également sur ses deux faces, ce qui fait que la prépondérance du contre-poids de la machine soulève alors le piston et le ramène au sommet du cylindre.

Quelquefois, au lieu d'employer, pour les soupapes coniques, la disposition à tiges enfilées, on fait mouvoir chaque soupape par un petit levier séparé qui agit sur la tige de la soupape, soit au moyen d'un étrier, soit au moyen d'une portion de roue dentée comme dans la *fig.* 34, *pl. V*. Ces dispositions sont d'ailleurs également applicables aux machines à double et à simple action. Dans la *fig.* 34, S est le tube à vapeur, *e* le tube d'éduction, et *a* le port du cylindre. La soupape d'admission est soulevée par l'action du levier *cd*, lequel se meut autour de l'axe *c*, qui traverse la boîte à vapeur. Dans le même instant, la soupape d'éduction est fermée par le moyen du levier *of*, dont le pivot est en *o*. Les deux tiges *dg* et *fh*, qui produisent ces mouvemens, sont mises en jeu, soit par la machine elle-même, soit occasionnellement, par les leviers à manche que dirige le machiniste; et il est toujours entendu que, dans cette disposition comme dans la précédente, la soupape d'admission d'en haut et la soupape d'éduction d'en bas, ainsi que la soupape d'admission d'en bas et la soupape d'éduction d'en haut, quoique mues par des leviers séparés, sont dirigées par une tige commune, qui leur fait exécuter leurs mouvemens par une action simultanée. Enfin, il faut ajouter que dans tous ces systèmes, les soupapes fermantes sont toujours closes

un instant avant l'ouverture des soupapes ouvrantes, parce que, sans cela, la vapeur, trouvant le passage entièrement libre, s'échapperait sans agir sur le piston.

Les *soupapes à vapeur à double siége* sont ainsi nommées parce qu'elles reposent en deux points sur l'ouverture qu'elles doivent fermer. On les désigne aussi sous le nom de soupapes *à couronne*, parce que leur forme offre quelque ressemblance avec une couronne royale. Les *fig.* 38 et 39, *pl. V*, représentent une de ses soupapes vue séparément. Elle est composée de deux parties, l'une *abcd*, qui est fixe, et l'autre *efgh*, qui est mobile. La portion fixe est un cylindre clos par le haut, et percé latéralement de fenêtres par lesquelles la vapeur peut passer du dehors à l'intérieur. Le centre de ce cylindre est occupé par une douille servant à recevoir un boulon qui, au moyen de la traverse *ik*, fixe cette portion de la soupape sur l'ouverture où elle doit être établie. La portion mobile, ou soupape proprement dite, est au contraire pleine sur son pourtour latéral, et ouverte à sa partie supérieure. Elle contient de même une douille centrale dans laquelle est fixée la tige *t*, qui la fait mouvoir : cette douille tient au pourtour par une traverse en croix. En comparant les deux *fig.* 38 et 39, on voit que quand la soupape est baissée, tout passage est fermé à la vapeur, et que dès qu'elle est soulevée, même d'une très-petite quantité, un passage considérable est aussitôt ouvert à la vapeur, puisque les fenêtres latérales sont immédiatement découvertes en totalité, soit au-dessus, soit au-dessous des oreilles *g*, *h*. C'est là un très-grand avantage ; mais un autre non moins important consiste en ce que, dans ces soupapes, la pression de la vapeur sur la portion mobile ne s'exerce que sur les deux petites bandes étroites qui forment les deux siéges, autour des circonférences *ab* et *cd* ; de sorte qu'il n'y a pas besoin d'employer une force considérable pour ouvrir la soupape à la main, comme cela a lieu pour les soupapes coniques, dans lesquelles la pression de la vapeur s'exerce sur la surface totale du disque à soulever. Les soupapes à double siége sont en usage dans les machines de Cornwall. Les dimensions de ces machines et la haute pression à laquelle on y fait travailler la vapeur, en rendent l'emploi particulièrement nécessaire, mais il y aurait certainement avantage à les introduire également dans plusieurs autres systèmes de machines.

§ IV. *Des excentriques et encliquetages.*

Après avoir fait connaître les divers appareils en usage pour distribuer la vapeur, il reste à expliquer comment ces appareils sont mis en action par la machine elle-même. On emploie pour cela deux moyens : l'excentrique et l'encliquetage. Le premier, exigeant un mouvement de rotation, ne convient guère qu'aux machines à double action, puisque l'on ne fait presque que ces machines rotatives ; le second s'applique aux machines à double et à simple action, mais la simplicité de l'excentrique fait qu'on le préfère presque toujours quand les machines sont à double action. Nous allons expliquer successivement la disposition et l'action de ces deux sortes d'appareils.

L'*excentrique* est une roue montée sur un axe passant en un autre point que son centre, et qui, en tournant autour de cet axe, se déplace à droite et à gauche, et sert par ce moyen à transformer le mouvement de rotation de l'axe en un mouvement de va et vient. La *fig* 49, *pl. VII*, représente cet appareil pour un tiroir ordinaire, et s'applique de même à un robinet. *a* est le centre de l'axe, et *c* le centre de l'excentrique. Celui-ci est formé d'une poulie *efc*, percée d'une ouverture pour recevoir l'axe de rotation *a*, et solidement fixée sur cet axe au moyen d'une vis de pression *d*, de sorte qu'elle tourne nécessairement avec lui. Cette poulie porte en outre à sa circonférence une gorge carrée, dans laquelle est placé un anneau ou collier en fer doux *gihk*, composé de deux moitiés réunies en *h* et *g* par des écrous, qui en forment un anneau complet. Ce collier embrasse la poulie sans la serrer, de sorte que celle-ci peut tourner dans l'intérieur sans difficulté. Enfin, les écrous *g*, *h*, qui servent à joindre les deux moitiés de l'anneau, servent aussi à y fixer deux tiges *hb*, *gb*, qui se réunissent, au point *b*, en une barre unique *bl*. D'après cette disposition, il est facile de comprendre que, lorsque l'axe *a* tourne sur lui-même, la poulie est entraînée dans sa rotation, mais non le collier qui l'entoure, parce qu'il glisse sur la circonférence de la poulie. D'autre part, dans ce mouvement, le point *c* décrit une circonférence autour du point *a*, et, par conséquent, à chaque demi-révolution, il se trouve alternativement écarté à droite et à gauche du point *a*, d'une quantité égale à la distance *ac*, qui est l'excentricité ou la distance du centre de l'axe à celui de l'excentrique. Mais le point *c* est aussi le centre du collier mobile ; donc ce collier se trouve transporté, tout d'une pièce, à droite et à gauche du point *a*, d'une quantité égale à l'excentricité. Ce mouvement du collier se transmet nécessairement à l'extrémité de la barre *bl*, et ainsi, l'on voit définitivement que la rotation de l'excentrique communique au point *l* un mouvement de va et vient, dont l'amplitude totale est égale à deux fois l'excentricité *ac*.

Ce premier point établi, il est facile de voir comment le mouvement horizontal alternatif de la barre *bl* transmet à la tige *ox* du tiroir le mouvement vertical alternatif, qui est nécessaire pour ouvrir et fermer successivement les passages de la vapeur. A cet effet, un axe horizontal *z* porte trois leviers. Le premier, *zl*, est attaché à l'extrémité de la barre de l'excentrique ; le deuxième, *zv*, est lié à la tige du tiroir *ox*, et enfin, le troisième, *zy*, supporte un contre-poids capable d'équilibrer le poids du tiroir et de la tige *ox*. A une simple inspection de la figure, on reconnaît que le mouvement alternatif du point *l* communique nécessairement à la tige *ox*, et, par conséquent, au tiroir, le jeu de va et vient exigé pour la distribution de la vapeur ; et comme, dans ce mouvement, v'' et v''' sont les positions extrêmes du point *v*, on voit que le déplacement alternatif de la tige *ox* s'étendra sur la ligne $v''v'''$, dont la longueur dépend du bras de levier *zv*. Pour qu'on puisse au besoin manœuvrer le tiroir à la main, indépendamment de l'excentrique, la barre de celui-ci n'est liée au levier *zl* que par une entaille *l*. A cet effet, le levier *zl* est formé d'une fourchette, entre les deux bran-

ches de laquelle passe la barre, et celle-ci s'y embraye au moyen d'un boulon poli, qui entre dans l'entaille. On peut donc, en soulevant la barre avec l'aide du manche *p*, désengager le boulon. Alors, en soutenant la barre dans cette position, par un support quelconque, l'entaille se trouve trop haute pour embrayer le levier *zl*, et, par conséquent, on peut faire mouvoir le tiroir à la main, par des leviers particuliers, sans en être empêché par l'action de l'excentrique. Les tiges *ox* et *y*M sont d'ailleurs maintenues dans la direction verticale par des guides, qui empêchent les oscillations du poids M et les déviations de la tige du tiroir.

Lorsque la distribution de la vapeur dans une machine est exécutée par le moyen d'un tiroir unique, comme celui-ci sert à la fois à découvrir les passages qui doivent être ouverts et à intercepter ceux qui doivent être clos, il n'y a besoin que d'une seule tige semblable à *ox*, et alors la disposition qui précède est suffisante. Mais quand, au lieu d'un tiroir ou d'un robinet, on emploie les soupapes à vapeur, comme il y a quatre ouvertures qui doivent être ouvertes et fermées par paires, il faut nécessairement deux tiges au lieu d'une. L'appareil exige donc alors un peu plus de complication. La *fig.* 50, *pl. VII*, représente la disposition en usage. *hlg* est l'excentrique, *zl* le levier à fourchette dans lequel s'embraye l'entaille *l*, et *z* l'axe fixe. Jusqu'ici les dispositions sont semblables à celles de la *fig.* 49 ; mais au lieu d'un levier double *vy*, il y en a deux, savoir, *vy* et $v'y'$, et chacun d'eux agit sur une tige qui manœuvre une paire de soupapes, savoir, le levier *vy* sur la tige *o*, qui manœuvre la soupape d'admission d'en haut et la soupape d'éduction d'en bas, et le levier $v'y'$ sur la tige o' qui manœuvre la soupape d'admission d'en bas et la soupape d'éduction d'en haut, d'une manière analogue à ce qu'on a expliqué sur la *fig.* 44. En outre, ces deux leviers, *vy*, $v'y'$, ne sont pas fixés sur l'axe *z*, comme auparavant ; ils tournent au contraire librement sur cet axe, qu'ils ne font qu'embrasser, de sorte que, quand ils sont abandonnés à eux-mêmes, ils sont entraînés par la prépondérance de leur contre-poids M ou M', et retombent aussitôt dans la position occupée sur la figure par le levier $v'y'$. Ces contre-poids M et M' sont des masses de métal enfilées dans les leviers Mα et M'α', dont les points fixes sont en α et α'. D'un autre côté, sur le levier à fourchette *zl*, sont fixées deux pattes à crochet *zn* et zn', *fig.* 50 et 51, qui, à chaque oscillation de ce levier, se lèvent ou se baissent ; et quand ces pattes se baissent, elles appuient sur les bras *zv*, zv', des leviers mobiles *vy* et $v'y'$, et obligent par conséquent ces leviers de participer momentanément au mouvement de l'excentrique. Mais dès que, par l'oscillation contraire du levier à fourchette, l'une de ces pattes se relève, le bras qu'elle avait fait baisser se relève aussitôt par l'effet du contre-poids. Ainsi, sur la figure, le levier à fourchette *zl* étant poussé à droite, la patte *n* presse alors sur le bras *zv*, le fait baisser, et, par conséquent, tire la tige *o* vers le bas. Ensuite, dès que le levier à fourchette, en continuant d'osciller, repassera vers la gauche, la patte *n* se relèvera ; et, à cause du contre-poids, le levier *zv* suivra ce mouvement jusqu'à ce que la

tige *o* ne puisse plus remonter davantage. Alors le levier *zv* s'arrêtera, et la patte *n* continuera de s'élever en se séparant du bras *zv*, comme on le voit représenté sur la figure pour le levier *zv'*, qui est précisément dans ce cas. La patte *n* continuera donc de remonter sans qu'il en résulte aucun effet sur le levier *zv;* mais, après un certain temps, quand le levier à fourchette sera suffisamment incliné vers la gauche, la patte *n'* viendra à son tour en contact avec le bras *zv'*, le baissera jusqu'à la fin de l'oscillation, puis le laissera remonter par l'effet du contre-poids M', et, enfin, s'en séparera de nouveau, comme nous l'avons expliqué pour l'autre patte. Par ce moyen, on voit donc que chacune des deux tiges *o* et *o'*, qui manœuvrent les soupapes, sera successivement tirée vers le bas par les pattes *n* et *n'*, puis ramenée en haut par les contre-poids, et que ce mouvement s'établira sans interruption, tant que l'excentrique continuera d'être embrayé sur le levier à fourchette. Si, au contraire, on désembraye celui-ci, à l'instant les deux tiges *o* et *o'* remonteront par l'effet des contre-poids; mais en manœuvrant alors les soupapes par le moyen des leviers à manche, le machiniste pourra gouverner la machine à son gré, sans en être empêché par l'excentrique.

L'*encliquetage* est une combinaison de contre-poids, de tasseaux et de cliquets, qui servent à ouvrir, fermer et retenir les soupapes qui opèrent la distribution de la vapeur dans la machine. On emploie ces appareils, soit pour les machines à double action, soit pour les machines à simple action; mais ce n'est guère que dans le comté de Cornwall qu'on en fait usage pour les machines à double action, ou rotatives.

Les *fig.* 47 et 48, *pl. VII*, représentent un encliquetage pour une machine à double action. On y voit quatre soupapes : deux en haut, pour l'introduction et la sortie de la vapeur au-dessus du piston, et deux en bas, pour l'admission et la sortie de la vapeur au-dessous du piston. Ces soupapes sont ouvertes et fermées par paires, au moyen de l'encliquetage, de sorte que la soupape supérieure d'admission et la soupape inférieure d'éduction sont toujours ouvertes et fermées dans le même instant, ainsi que la soupape inférieure d'admission et la soupape supérieure d'éduction. Les soupapes sont, du reste, de la forme à couronne ou à double siége, décrites plus haut. Sur la *fig.* 48, *a* et *a'* sont les deux soupapes d'admission, et *b* et *b'* les deux soupapes d'éduction. La vapeur arrive de la chaudière dans la colonne ou tube SS, et elle remplit sans obstacle toute la colonne, jusqu'à l'entrée de chacune des deux soupapes d'admission. Ainsi, dès que l'une de celles-ci s'ouvre, la vapeur pénètre à l'instant dans le cylindre, du côté correspondant du piston. *eeE* représente le tube d'éduction; il s'étend de même de la soupape supérieure d'éduction *b'* à la soupape inférieure d'éduction *b*, et dès que l'une de ces deux soupapes s'ouvre pour laisser sortir de la vapeur, celle-ci s'écoule immédiatement par le tube E, qui la conduit au condenseur. Enfin, entre les deux soupapes supérieures, *a*, *b'*, il y a un espace *d*, fermé par les deux sou-

papes. Cet espace forme l'entrée du tuyau *D* (*fig.* 47) et conduit par conséquent au port supérieur du cylindre, qui est toujours ouvert. De même, entre les deux soupapes inférieures *a'*, *b*, l'espace *d'*, clos par les deux soupapes, conduit librement au tuyau D', c'est-à-dire au port inférieur du cylindre.

Cela posé, si l'on examine la *fig.* 47, mais sans perdre de vue la *fig.* 48, pour y retrouver les portions qui se trouvent cachées dans la première, une courte explication suffira pour faire comprendre comment l'encliquetage ouvre et ferme successivement les soupapes. En effet, *c* est un axe mobile, auquel sont fixés, comme on le voit sur la figure, quatre leviers divergens qui tournent nécessairement avec lui. Le premier communique par la tringle courbe *m* avec la soupape d'admission d'en haut *a*, et sert à ouvrir et fermer cette soupape, au moyen d'un levier et d'une tige pareils à *pr* et *ll*, mais cachés derrière ceux-ci. La tringle *m*, dont il est ici question, est masquée en partie par la tringle *n'*, dont nous parlerons un peu plus loin, et la soupape d'admission *a* se trouve également cachée par la soupape d'éduction *b'*, qui est seule visible sur la *fig.* 47. Le second levier communique par la tringle *n* avec la soupape d'éduction d'en bas *b*, et sert à ouvrir ou fermer cette soupape au moyen du levier coudé *vu*. Le troisième levier supporte, suspendu au bas de la tige *o*, un contre-poids qui fait tourner l'axe *c* sur lui-même, et, par conséquent, ouvre aussitôt les deux soupapes, ainsi qu'il est facile de le reconnaître sur la figure. Le quatrième levier est le levier à manche P, qui, lorsqu'il est pressé de haut en bas, fait tourner l'axe *c* en sens contraire du contre-poids, et, par conséquent, relève celui-ci, en fermant en même temps les deux soupapes. Enfin, outre ces quatre leviers, l'axe *c* porte, à son extrémité la plus éloignée, un quart de cercle dont nous expliquerons l'usage un peu plus loin.

Une disposition semblable se répète sur un second axe *c'*, qui sert à ouvrir et fermer les deux autres soupapes, c'est-à-dire la soupape inférieure d'admission *a'*, et la soupape supérieure d'éduction *b'*. Cet axe porte également quatre leviers: le premier servant à ouvrir et fermer la soupape *a'*, au moyen de la tringle *m'* et du levier *m'u*; le deuxième servant au même usage pour la soupape d'éduction d'en haut *b'*, au moyen de la tringle droite *n'* et du levier *pr*; le troisième supportant un contre-poids suspendu au bas de la tige *o'*, et dont la chute fait ouvrir à la fois les deux soupapes *a'* et *b'*; et, enfin, le quatrième est le levier à manche P', qui, lorsqu'on le presse de bas en haut, fait tourner l'axe *c'*, relève le contre-poids, et ferme les deux soupapes. Enfin, l'axe *c'* porte un quart de cercle semblable à celui de l'axe précédent.

L'usage des deux quarts de cercle dont nous venons de parler est de retenir et de dégager successivement les contre-poids des deux axes, de sorte que, au moment où le contre-poids de l'un se relève, celui de l'autre tombe de lui-même, et réciproquement. Cette action se comprend aisément à l'inspection de la figure. En effet, si l'on suppose pour un instant que le contre-poids de l'axe *c* tombe, cet axe tournera, et, par conséquent, son quart de cercle, tournant en même temps, se

trouvera engagé sous celui de l'axe c', comme il est facile de se le représenter. L'axe c', quoique sollicité par son contre-poids, se trouvera donc retenu sans pouvoir tourner. Mais si, un moment après, en appuyant sur le levier à manche P, on relève le contre-poids o et l'on fait tourner l'axe c, dès que l'angle supérieur de son quart de cercle aura dépassé l'angle inférieur du quart de cercle de l'axe c', celui-ci sera entraîné par son contre-poids et l'axe c' tournera; mais on remarquera que, dans ce mouvement, le quart de cercle de l'axe c' se trouvera à son tour engagé sous celui de l'axe c, et, par conséquent, il empêchera celui-ci de céder à l'action de son contre-poids. Ainsi, on voit qu'au moyen de ces deux quarts de cercle, il suffit de relever l'un des contre-poids pour faire tomber l'autre, et réciproquement; et comme la chute de chaque contre-poids ouvre à la fois les deux soupapes correspondantes, on voit aussi qu'il suffit de fermer l'une des deux paires de soupapes pour ouvrir l'autre en même temps. Cela posé, il reste seulement à expliquer comment la clôture successive de chaque paire de soupapes est exécutée par la machine elle-même.

Pour cela, la tige de la pompe d'air TT passe entre les deux leviers à manche P, P', en les rasant dans son mouvement, et deux tasseaux t, t', fixés sur cette tige par des vis de pression, appuient successivement sur les leviers et les placent dans la position convenable. Supposons, en effet, que le machiniste fasse tomber le contre-poids de l'axe c, les deux soupapes a et b s'ouvriront aussitôt. La vapeur pénétrera donc dans le cylindre par la soupape d'admission d'en haut a, tandis que la vapeur qui occupait la portion inférieure du cylindre s'écoulera dans le condenseur par la soupape d'éduction d'en bas b. Par conséquent le piston exécutera sa course descendante, et la tige TT descendra en même temps. Quand le piston sera parvenu près de la fin de sa course, le tasseau t rencontrera le levier à manche P, qui est du même côté de la tige TT, et qui avait été relevé par la chute du contre-poids. Ce tasseau pressera donc de haut en bas sur le levier P; il fera tourner l'axe c, et, dans cette action, il relèvera le contre-poids o, et fermera les deux soupapes a et b. Dès que l'axe aura tourné d'une quantité suffisante, le quart de cercle de l'axe c' se trouvera dégagé, son contre-poids tombera, et le quart de cercle de l'axe c se trouvera retenu dans sa position, de sorte que les deux soupapes a et b continueront de rester fermées. Mais, dans le moment où le contre-poids de l'axe c' est tombé, les deux soupapes a' et b', c'est-à-dire la soupape d'admission d'en bas et la soupape d'éduction d'en haut, se sont ouvertes. Ainsi le piston a commencé aussitôt à remonter dans le cylindre, et il continue son mouvement. Quand il est parvenu près de la fin de sa course, le tasseau t', qui remonte avec la tige TT, rencontre le levier P', que la chute du contre-poids a fait baisser; il soulève ce levier, fait tourner l'axe c', relève le contre-poids o' et ferme les deux soupapes a', b'. Mais puisque le mouvement du quart de cercle supérieur dégage le quart de cercle inférieur, il s'ensuit que le contre-poids de l'axe c tombe à son tour, ce qui fait ouvrir les deux autres soupapes. Ainsi, le piston fournit une nouvelle course descendante, et ainsi de suite.

On voit aussi des machines dans lesquelles les quarts de cercle sont remplacés par un cliquet double. C'est une petite pièce de fer portant un arrêt à chaque bout; elle est mobile autour de son centre, et pressée par un ressort x, comme on le voit sur la *fig.* 52, *pl. VII*. Cette pièce est placée vers l'extrémité des deux axes. Quand le contre-poids o' est relevé par la révolution de l'axe c', la dent f', pressant d'abord contre la partie courbe y', s'engage dans son cliquet et s'y trouve arrêtée; mais dans cette action, il est évident qu'elle dégage la dent f de son cliquet : le contre-poids o de l'axe c tombe donc à l'instant.

Pour appliquer aux machines à détente l'encliquetage que nous venons de décrire, le tube à vapeur est intercepté par une soupape que l'on nomme *soupape à couper*. Cette soupape, mise en jeu par la machine elle-même au moyen d'un système de leviers, s'ouvre au commencement de chaque oscillation , et se referme ensuite, après que le piston a parcouru une portion seulement de sa course. Par ce moyen la vapeur se trouve interceptée au moment voulu, quoique la soupape d'admission continue cependant de rester ouverte. On peut aussi faire manœuvrer chacune des quatre soupapes par un axe séparé, comme dans les encliquetages que nous allons décrire; et alors, pour produire la détente, il n'y a pas besoin de la soupape à couper.

L'exemple qui précède suffit pour faire comprendre le jeu et la disposition de l'encliquetage dans les machines rotatives; nous allons maintenant passer à l'explication des encliquetages appliqués aux machines à simple action, soit à celles de Watt, soit à celles de Cornwall.

La *fig.* 68, *pl.* X, représente l'encliquetage d'une machine de Watt à simple action, établie, par M. Wicksteed, à la distribution publique des eaux de Old-ford, à Londres.

C est le cylindre de la machine, d le port supérieur du cylindre et d' le port inférieur. S représente la coupe du tube qui amène la vapeur de la chaudière au cylindre; a est la soupape d'admission, appelée quelquefois aussi *soupape de détente* ou *d'expansion*, q la soupape d'équilibre, et e la soupape d'éduction. Toutes trois s'ouvrent en se levant, et sont de la forme *conique* que nous avons décrite plus haut. Les deux soupapes q et e sont à tiges enfilées, c'est-à-dire que la tige de la soupape d'équilibre q est un cylindre creux formant boîte à étoupes, et au travers duquel passe la tige de la soupape d'éduction e, ainsi que nous l'avons expliqué, en décrivant cette disposition dans le § III de ce chapitre. Chaque soupape est ouverte par la chute d'un contre-poids et fermée par le choc d'un tasseau. A cet effet, chacune d'elles est gouvernée par un axe horizontal qui est soutenu entre deux montans verticaux, et porte trois petits leviers divergens, le premier communiquant à la soupape, le deuxième supportant un contre-poids, et le troisième susceptible de recevoir, en temps convenable, le choc d'un tasseau, comme on va l'expliquer.

L'axe a' est celui qui gouverne la soupape d'admission. Il porte, comme on l'a dit, trois leviers. Le premier communique, au moyen de la tringle a'', à la soupape a, et, selon qu'on tourne l'axe dans un sens ou dans l'autre, la tringle a'' se relève

elle est représentée sur la figure, c'est-à-dire le piston au sommet du cylindre, et que le machiniste, en décrochant à la main le cliquet de l'axe e', fasse tomber les contre-poids de la soupape d'admission *a* et de la soupape d'éduction *e*, et, par conséquent, ouvre ces deux soupapes, tandis que la soupape d'équilibre *q* continue de rester fermée. La vapeur arrivera de la chaudière par le tuyau à vapeur S, traversera la soupape *a* et pénétrera par le port supérieur *d* dans le cylindre, au-dessus du piston. Dans le même instant, la vapeur qui se trouvait au-dessous du piston sortira du cylindre par le port inférieur d', traversera la soupape *e*, et s'écoulera dans le condenseur par le tuyau d'éduction E', qu'on ne voit ici qu'en coupe transversale. Le piston commencera donc sa course descendante, en fesant descendre en même temps la tige TT, qui est suspendue au grand balancier de la machine. Quand le piston aura parcouru une certaine portion de sa course, le tasseau *t* rencontrera la patte A; en continuant de descendre, il appuîra sur cette patte, relèvera le contre-poids O et fermera la soupape d'admission. Dès ce moment, il n'arrivera plus de vapeur dans le cylindre, mais celle qui y est déjà commencera à se dilater et continuera de pousser le piston, quoique avec une force décroissante. La tige TT continuera donc toujours de descendre, et l'on remarquera que la patte A ne mettra point d'obstacle à ce mouvement, parce que l'extrémité de cette patte est coudée, de telle sorte qu'en baissant elle devient verticale, et ainsi laisse glisser le tasseau sans se déranger. On remarquera encore que, pendant toute la descente du tasseau, la patte A ne pourra se relever, et, par conséquent, la soupape d'admission continuera d'être fermée, quoiqu'il n'y ait pas encore de cliquet accroché. Lorsque le piston sera arrivé près de la fin de sa course, le tasseau caché par la tige TT rencontrera le levier à manche E, qu'il baissera. L'axe e' tournera, le contre-poids sera relevé, la soupape d'éduction *e* fermée, et la dent de l'axe e', dépassant le cliquet correspondant, s'y engagera. Ainsi l'axe e' se trouvera arrêté, et, par conséquent, aussi l'axe a', à cause de la tringle de jonction qui les unit. Les deux soupapes d'admission et d'éduction seront donc dès lors maintenues fermées jusqu'au décrochement de leur cliquet.

Mais nous avons vu que, d'après la disposition du cliquet double, quand le cliquet de l'axe e' s'engage, celui de l'axe q' se trouve nécessairement désengagé. Au moment où l'axe e' est arrêté par son cliquet, l'axe q' s'échappe donc du sien. Ainsi, le contre-poids de l'axe q', tombant aussitôt, ouvre la soupape d'équilibre, et la vapeur qui remplissait le haut du cylindre se répand dans les deux parties du cylindre; mais elle ne peut s'écouler par le tube d'éduction, parce que la soupape d'éduction *e* est fermée. La vapeur s'étant donc répandue des deux côtés du piston, celui-ci se trouve pressé également sur les deux faces, ou en équilibre dans la vapeur. D'autre part, à l'extrémité opposée du grand balancier de la machine, il y a un contre-poids considérable qui tend toujours à faire remonter le piston, mais qui a été relevé, pendant la course descendante, par l'action de la vapeur au-dessus du piston. Maintenant que cette action n'existe

plus, le contre-poids retombe par son poids, et le piston remonte dans le cylindre, entraînant avec lui la tige TT, qui remonte en même temps. Quand le piston est parvenu près de la fin de sa course, le tasseau t', en remontant, vient heurter le levier à manche Q, le relève, fait tourner l'axe q', et, par conséquent, ferme la soupape d'équilibre, relève son contre-poids et accroche son cliquet. Dès ce moment donc, la soupape d'équilibre reste fermée. Mais la disposition du cliquet double fait que, dans le même instant, le cliquet de l'axe e' se trouve décroché. Cet axe, ainsi que l'axe a', sont donc entraînés par leurs contre-poids, et les deux soupapes d'éduction et d'admission se trouvent ouvertes aussitôt. Ainsi, la machine se trouve remise dans l'état où nous l'avons considérée au premier instant, et, par conséquent, son mouvement se continue par l'action successive des tasseaux et des contre-poids, jusqu'à ce que le machiniste suspende définitivement son action en fermant à la fois toutes les soupapes et accrochant tous les cliquets.

L'encliquetage que nous venons de décrire est celui qu'on emploie dans les machines de Watt à simple action. Pour compléter l'explication générale de cette espèce d'appareil, nous donnerons encore la figure d'un encliquetage adapté aux machines de Cornwall à simple action.

Le cylindre à vapeur de la machine est représenté en C (*fig.* 70, 71 et 72, *pl. XI*). Il est entouré d'une chemise de métal cc, qui se remplit de vapeur au moyen du petit tube t, et le tout est placé dans une seconde enveloppe de bois $c'c'$, remplie de cendres tamisées, pour empêcher le refroidissement du cylindre par l'air extérieur. La vapeur arrive de la chaudière par le tube à vapeur S, et elle pénètre d'abord jusqu'à la soupape régulatrice x. Cette soupape, ainsi que nous le dirons plus loin, est de forme conique, et ouvre à la vapeur un passage d'autant plus considérable qu'elle est soulevée davantage. Elle est gouvernée par la tige x' et par un système de leviers et de tringles x'', x''', x_{i}, x_{ii}, qui aboutissent en avant de la machine et se terminent par un écrou, au moyen duquel le machiniste peut relever la tringle verticale x_{ii}, et, par conséquent, ouvrir la soupape, au degré précis qu'il juge convenable. Une fois cette soupape fixée, on n'y touche plus pendant tout le travail, à moins qu'on ne veuille augmenter ou diminuer la vitesse du mouvement.

La vapeur, ayant traversé la soupape régulatrice x, se répand dans la boîte à vapeur V et se trouve prête à pénétrer dans le cylindre aussitôt que la soupape d'admission est ouverte. Celle-ci est représentée en a. Elle est gouvernée par l'axe horizontal a', qui porte trois petits leviers divergens. Le premier communique à la soupape par la tringle horizontale a'' et le levier de renvoi a''' a''', qui lève ou baisse la soupape au moyen de sa tige. Le deuxième a_{i} supporte un contre-poids o qui, en tombant, ouvre immédiatement la soupape, comme on le reconnaît en examinant la figure. Le troisième est le levier à double patte A, qui agit en sens contraire du contre-poids, de sorte qu'en appuyant sur la patte A, on ferme la soupape. Enfin, à l'une de ses extrémités, l'axe a' porte un petit secteur, comme ceux que nous avons déjà

décrits, et qu'on voit représenté sur la *fig.* 71. Lorsque la patte A est baissée, l'axe tourne et le secteur tourne en même temps; mais, dès que son angle supérieur a dépassé l'arrêt du cliquet α, celui-ci tombe derrière le secteur, et, dès ce moment, l'axe ne peut plus reculer, jusqu'à ce qu'en levant le cliquet, on dégage l'arrêt qui retient le secteur. Cette disposition est analogue à celle que nous avons décrite, en expliquant l'action des encliquetages à double effet.

La soupape d'éduction est représentée en e. Elle est de même gouvernée par l'axe horizontal e', qui est muni de trois leviers, l'un communiquant à la soupape par la tringle e'' et le levier de renvoi e'''; l'autre e_1 supportant un contre-poids N (*fig.* 70), qui tend toujours à ouvrir la soupape; et enfin, le troisième formant le levier à manche E, au moyen duquel on peut relever le contre-poids et fermer la soupape. En outre, quand le contre-poids est relevé, l'axe e' est arrêté par un secteur et un cliquet ϵ (*fig.* 71), dont l'action est en tout semblable à celle du précédent.

Enfin, la soupape d'équilibre est représentée en q. Elle est gouvernée par l'axe q', auquel sont encore fixés trois leviers comme pour les autres soupapes. L'un communique à la soupape par la tringle q' et le levier de renvoi q'''; le deuxième q_1 porte un contre-poids M (*fig.* 70), qui tend toujours à ouvrir la soupape, et enfin, le troisième est le levier à manche Q qui, lorsqu'on le relève, remonte le contre-poids et ferme la soupape.

Outre les dispositions précédentes, les soupapes sont fermées par des tasseaux fixés à la tige TT de la pompe d'air et agissant sur les leviers à manches, comme dans les encliquetages déjà décrits; mais l'ouverture des soupapes ne s'y opère pas de la même manière. On emploie pour cet objet un appareil particulier nommé *cataracte*, qui permet de régler la vitesse de la machine en fixant l'intervalle de temps qu'on veut laisser écouler entre les courses successives du piston. Cet appareil, sur lequel nous reviendrons avec plus de détails dans le § VIII de ce chapitre, consiste en un petit réservoir rempli d'eau (*fig.* 63, *pl. IX*), qui contient un corps de pompe vertical p, dont le plongeur est relevé chaque fois par la machine, au moyen d'un taquet qui appuie sur le long levier l, et rabaissé ensuite par un contre-poids i. Ce corps de pompe contient deux soupapes: l'une, au fond, qui s'ouvre du dehors au dedans, et laisse, par conséquent, pénétrer l'eau du réservoir dans le corps de pompe, pendant la levée du plongeur; l'autre sur le côté, qui s'ouvre du dedans au dehors et laisse au contraire ressortir l'eau du corps de pompe dans le réservoir pendant la descente du plongeur. En outre, le tuyau par lequel l'eau ressort du corps de pompe porte un robinet qui permet de faire varier à son gré le temps nécessaire à la sortie de l'eau.

D'après cette disposition, si l'on se rapporte à la *fig.* 70, *pl. XI*, et qu'on y considère d'abord la cataracte de droite, qui est destinée à ouvrir les soupapes d'admission et d'éduction, on verra qu'à chaque course descendante du piston à vapeur, le taquet t_1 appuie sur le long levier l, relève le contre-poids de la cataracte, fait monter

le plongeur et aspire l'eau du réservoir dans le corps de pompe. Puis, dès que le taquet remonte, c'est-à-dire pendant la course montante du piston à vapeur, le contre-poids i commence à redescendre par son poids, mais, à mesure seulement que l'eau admise dans le corps de pompe peut en ressortir par le robinet latéral. En même temps que le contre-poids redescend, la tringle m se relève, et, quand elle est remontée suffisamment, elle finit par soulever les cliquets et ouvrir les deux soupapes. Ainsi, l'on voit qu'en diminuant de plus en plus l'ouverture du robinet de sortie de l'eau, ce qui se fait au moyen de la tringle de renvoi y, on peut faire durer la montée de la tringle m aussi longtemps qu'on veut, et, par conséquent, laisser écouler l'intervalle de temps que l'on juge convenable avant de rouvrir les soupapes, c'est-à-dire avant de faire recommencer à la machine une nouvelle course descendante.

Cette explication se rapporte à la cataracte de droite; mais actuellement si l'on considère la cataracte de gauche, qui est destinée à ouvrir la soupape d'équilibre, on verra que ses mouvemens sont inverses. En observant le sens dans lequel la chaine s'enroule sur la poulie x', et en faisant attention que le taquet t_{u} de la tige TT est en dessous du levier l_{1}, on reconnaîtra que le plongeur de cette cataracte se relève en même temps que le piston à vapeur remonte dans le cylindre, et redescend par la chute du contre-poids i' pendant le mouvement contraire de la machine. La tringle m' remonte donc pendant la course descendante du piston à vapeur, et c'est à la fin de cette course qu'elle finit par ouvrir la soupape d'équilibre. Ainsi, en définitive, la cataracte d'admission se charge pendant la course descendante du piston à vapeur et se vide pendant la course montante, après quoi elle ouvre la soupape d'admission, pour laisser entrer une nouvelle masse de vapeur dans le cylindre; et la cataracte d'équilibre se charge pendant la course montante et se vide pendant la course descendante, à la fin de laquelle elle ouvre la soupape d'équilibre, pour laisser passer au-dessous du piston la vapeur qui a terminé son action au-dessus.

Ces dispositions étant bien comprises, le jeu de l'encliquetage le sera également. En effet, supposons d'abord toutes les soupapes fermées, et le piston en haut du cylindre, dans la position où il se trouve toujours à la fin du travail, parce que le contre-poids suspendu à l'extrémité opposée du grand balancier l'y ramène naturellement, dès que la vapeur a cessé son action. Le machiniste, en soulevant le cliquet de la soupape d'éduction e, fait tomber son contre poids, qui ouvre à l'instant la soupape, et, en même temps, le robinet d'injection dans le condenseur s'ouvre au moyen de la tringle rr, qui est articulée sur l'axe e'. Le vide commence donc à s'établir sous le piston. Aussitôt après, en soulevant la tringle de la cataracte, il décroche de même le cliquet de la soupape d'admission a, qui est immédiatement ouverte par son contre-poids. La vapeur pénètre donc dans le cylindre au-dessus du piston, dans le même instant que le vide est opéré en dessous. Ainsi, comme la soupape d'équilibre reste toujours fermée, ce qui empêche la vapeur de passer d'une face à l'autre

du piston, il s'ensuit que celui-ci, pressé en dessus par l'action de la vapeur, commence sa course descendante dans le cylindre, en entraînant dans ce mouvement la tige TT de la pompe d'air. Quand il en a parcouru une certaine partie, le tasseau *t* rencontre la patte A, qui a été relevée par la révolution de l'axe *a'*, pendant la chute du contre-poids correspondant. Ce tasseau appuie sur la patte, la baisse, fait tourner l'axe *a'*, relève son contre-poids, ferme la soupape d'admission, et enfin accroche son cliquet. A partir de ce moment il ne pénètre donc plus de nouvelle vapeur dans le cylindre, mais celle qui y est déjà parvenue continue, par sa détente, à pousser le piston. Ainsi, la tige TT continue son mouvement. Quand le piston approche de la fin de sa course, le second tasseau *t'* vient presser sur le levier à manche E, le baisse, comme il est représenté sur la figure, relève son contre-poids, ferme la soupape d'éduction *e* et accroche son cliquet. Dès ce moment toute communication du cylindre au condenseur se trouve interrompue. Dans le même instant la tringle *m'* de la cataracte d'équilibre qui, pendant toute la descente du piston, a continué de remonter lentement par la chute de son contre-poids, atteint le cliquet de la soupape d'équilibre et le décroche. Le contre-poids de celle-ci tombe donc à l'instant et ouvre la soupape. Ainsi, la vapeur se répand dans toutes les parties du cylindre, et le piston cesse d'être pressé, soit sur une face, soit sur l'autre. Il continue cependant encore un instant son mouvement et termine sa course par l'effet de sa vitesse acquise; mais, comme le contre-poids suspendu à l'extrémité opposée du grand balancier est d'un poids considérable, il arrête promptement le piston et finit par l'entraîner en sens contraire, ou vers le sommet du cylindre.

Alors commence la course remontante, et la tige TT remonte en même temps. Quand le piston est près d'atteindre le sommet du cylindre, le tasseau *t''* qui présente sa saillie sur la face opposée de la tige TT, rencontre le levier à manche Q, qui a été abaissé par la chute du contre-poids, au moment de l'ouverture de la soupape d'équilibre. Il relève donc ce levier, remonte le contre-poids, ferme la soupape d'équilibre et accroche son cliquet. Alors le piston remonte encore un peu par l'action du contre-poids suspendu à l'extrémité du grand balancier; mais la vapeur se comprime entre le piston et le haut du cylindre, et le mouvement se ralentit graduellement jusqu'à l'arrêt complet du piston.

La machine reste alors en repos, parce qu'elle ne peut recommencer une nouvelle course descendante que par l'ouverture des soupapes d'admission et d'éduction, et que celles-ci restent toujours fermées. Mais bientôt la tringle de la cataracte d'admission, qui s'est relevée graduellement, par l'action de son contre-poids, pendant la course montante du piston à vapeur, finit par rencontrer le cliquet de la soupape d'éduction qu'elle soulève. A cet effet, ce cliquet passe au travers d'une boucle ou coulisse longitudinale pratiquée dans la tringle, de sorte que celle-ci remonte d'abord quelque temps sans agir sur le cliquet; mais, lorsque le bas de la coulisse rencontre le dessous du cliquet, elle le relève, décroche le contre-poids, et la soupape d'éduction s'ouvre

aussitôt. Ensuite, la tringle de la cataracte continue à remonter encore un peu. Puis, la tête de la tringle vient à son tour heurter le cliquet de la soupape d'admission, le soulève, décroche son contre-poids, et ouvre la soupape. Tout se trouve donc dès lors replacé comme à l'instant où nous avons pris la machine : ainsi, le piston recommence une nouvelle course descendante, suivie immédiatement d'une autre course montante ; puis, il attend que la cataracte d'admission ouvre les soupapes convenables, pour repartir, et ainsi de suite.

L'encliquetage que nous venons de décrire est celui de la machine de Cornwall à simple action, installée à Londres, à la distribution publique des eaux de Old-ford, par les soins de M. T. Vicksteed, à qui la science doit d'avoir le premier proclamé hors du comté de Cornwall, et fait reconnaître, par une série de belles expériences, les avantages de ce système de machines, qui avaient été niés jusque là. L'encliquetage de la *pl. XI*, ainsi que celui de la *pl. X*, sont tirés des dessins publiés par M. Vicksteed, dans la description détaillée des deux machines de Old-ford, l'une de Watt à simple action, l'autre de Cornwall.

§ V. *Du piston et des appareils destinés à maintenir sa tige dans la direction de l'axe du cylindre, ou du parallélogramme et des guides parallèles.*

La vapeur, une fois entrée dans le cylindre, commence son action contre le piston. Celui-ci est formé de deux pièces circulaires de métal réunies par des écrous et comprenant entre elles, soit une garniture de chanvre qui presse de toutes parts contre le cylindre, soit un assemblage de plusieurs anneaux métalliques qui remplissent le même but.

La *fig.* 66, *pl.* X, représente un *piston à garniture de chanvre*. *a* est le corps du piston, dont le diamètre est un peu moindre que celui du cylindre dans lequel il doit être placé. *b* est le couvercle ou disque supérieur du piston, d'un diamètre égal au précédent. Il se réunit au corps du piston par des écrous qui, en se serrant, enfoncent le couvercle de plus en plus, et, par conséquent, font ressortir davantage la garniture de chanvre comprise entre les deux pièces. Cette garniture doit déborder les parties métalliques, et serrer contre le cylindre assez fortement pour arrêter toute fuite de vapeur. Cette condition est assez difficile à remplir avec une garniture de chanvre ; elle exige que celle-ci soit serrée avec force et qu'on ait soin de l'examiner fréquemment, ce qui donne l'avantage aux pistons entièrement métalliques. Sur la figure, *d* est le pied de la tige du piston : sa forme est conique, ce qui fait qu'en donnant quelques coups sur la clef *f*, on peut toujours le maintenir parfaitement serré.

La tige du piston traverse le couvercle du cylindre dans une *boîte à étoupes*. C'est un conduit cylindrique ajouté au couvercle du cylindre, coulé d'une même pièce avec lui, et dans lequel est placée une garniture de chanvre assez fortement serrée contre la tige du piston, pour s'opposer à toute fuite de vapeur. A cet effet, le conduit ne présente, à sa partie inférieure, qu'une ouverture juste

assez large pour laisser passer la tige ; puis, au-dessus de ce point il s'élargit suffisamment à l'intérieur pour recevoir une garniture de chanvre serrée entre les parois et la tige du piston. Enfin, à son sommet, il porte un couvercle annulaire qui pénètre en partie dans l'intérieur et serre, par conséquent, la garniture d'étoupes qui y est contenue. Des vis, qui traversent le couvercle et s'engagent dans un rebord laissé autour du conduit, permettent de serrer l'étoupage à mesure qu'il s'use par le passage continuel de la tige, On reconnaît cette disposition dans les diverses figures des *pl. VI* et *VII*. Le fond et le couvercle de la boîte à étoupes sont garnis intérieurement d'un anneau en cuivre, pour diminuer autant que possible le frottement de la tige en ces points.

La *fig.* 67, *pl.* X, représente un piston métallique. *a* est le corps du piston, et *b* son couvercle, tous deux d'un diamètre un peu moindre que celui du cylindre. Le corps du piston *a* présente, en relief sur le fond et coulé avec lui, un anneau central *c*, c, et trois contre-forts *d*, *d*, *d*. L'anneau sert à recevoir et à fixer la tige du piston, qui y est maintenue par une clef *f*, comme dans le piston décrit précédemment, et les contre-forts servent à recevoir les écrous qui réunissent le couvercle au corps du piston. Entre ces deux dernières pièces sont placées trois bagues métalliques qui forment la garniture du piston, et, par conséquent, doivent un peu en déborder le corps et le couvercle, de manière à presser contre la face intérieure du cylindre. De ces trois bagues, celle qui est à l'intérieur, *e*, *e*, a la même hauteur que l'intervalle des deux disques; les deux autres, *g*, *h*, n'ont au contraire de hauteur que la moitié de l'épaisseur du piston, et elles sont jointes ensemble par une feuillure circulaire. Quand on tourne ces bagues, on leur donne exactement le diamètre du cylindre, puis, en les battant légèrement sur leurs bords intérieurs, on leur donne une tendance à s'ouvrir, de sorte qu'en les coupant ensuite chacune en trois portions, les trois pièces font ressort et tendent à se développer, ce qui les fait presser contre le cylindre. Alors elles sont reformées en anneau par le rapprochement des trois pièces, et placées ainsi entre le corps et le couvercle du piston, en ayant soin de les mettre plein sur joint, afin que la vapeur ne puisse se frayer un passage d'un joint à l'autre. Le ressort formé par la tendance des segmens à s'ouvrir suffit au commencement pour tenir le piston parfaitement serré contre le cylindre; mais, pour que cet état continue malgré l'usure des bagues, on place, dans l'intervalle des contre-forts, trois ressorts *k*, d'une hauteur égale à l'épaisseur du piston et que l'on peut serrer plus ou moins contre les anneaux en détournant les vis de pression *l*, *l*. Cel-lès-ci sont engagées dans un pas de vis pratiqué dans l'anneau central et reposent sur les ressorts par un arrêt. On dispose quelquefois les ressorts d'une autre manière, et l'on fait les pistons d'une forme quelque peu différente de celle qui précède; mais c'est toujours d'après le même principe de construction, ce qui nous dispense de nous y arrêter. Nous allons donc passer aux moyens destinés à maintenir la tige du piston dans la direction précise de l'axe du cylindre.

On sait que, dans la plupart des machines à vapeur, le piston est employé à faire alternativement monter et descendre un balancier qui, à son autre extrémité, transmet lui-même le mouvement au mécanisme que l'on se propose de faire agir. Mais, en oscillant ainsi au tour d'un centre, chacune des extrémités du balancier décrit nécessairement un arc de cercle. Si donc le piston était simplement attaché au balancier par un joint mobile, il est clair que la tige de ce piston, même en la supposant articulée en un autre point de sa longueur, serait alternativement tirée à droite et à gauche, et que, par conséquent, elle ne pourrait glisser dans la boîte à étoupes sans y produire un frottement considérable et un élargissement qui entraînerait une fuite de vapeur. Il est donc nécessaire d'introduire dans la machine un mécanisme propre à guider cette tige exactement dans la direction verticale qu'elle doit suivre. Ce but peut être atteint de deux manières, soit au moyen du parallélogramme de Watt, soit au moyen de guides parallèles.

Le *parallélogramme* est une combinaison de plusieurs tiges de fer liées à la tige du piston, et qui, en s'appuyant sur un pivot fixe pris hors de la machine et placé à l'opposé du balancier, tendent à donner à la tige du piston un mouvement oscillatoire contraire à celui que produirait seul le balancier de la machine; de sorte que de la combinaison des deux effets résulte le mouvement vertical cherché.

La *fig.* 58, *pl. VIII*, est destinée à faire comprendre l'application la plus simple du parallélogramme. Si l'on suppose une tige ou barre CB, mobile autour du point C, et une autre tige égale OD, mobile autour du point O, chacune de ces deux tiges, en oscillant autour de son point d'attache, fera décrire à son extrémité mobile B ou D un arc de cercle; et, par conséquent, si la bielle d'un piston vertical était attachée, soit en B, soit en D, cette bielle serait alternativement tirée à droite et à gauche pendant les oscillations des barres. Mais, si l'on réunit les deux points B et D par une troisième tige liée aux premières par des joints mobiles, et que l'on mette le système en oscillation, chacune des deux extrémités de la tige de jonction sera bien entraînée hors de la verticale par la barre aboutissante; mais, comme ces deux extrémités seront déplacées en sens contraire et de quantités qui doivent naturellement être sensiblement égales entre elles, le milieu M de la tige se trouvera maintenu, à très-peu près, dans la direction verticale. Par conséquent, en choisissant ce point pour y suspendre la tige du piston, celle-ci cessera d'éprouver les déviations auxquelles on veut remédier.

On conçoit donc comment la disposition qu'on vient de décrire peut maintenir la tige du piston, à très-peu près, dans la direction verticale voulue. Cette disposition, représentée sur la *fig.* 58, suppose l'emploi de deux barres CB et OD égales entre-elles; mais on peut encore parvenir au résultat cherché en employant deux barres inégales, pourvu que le point de suspension M soit alors placé, sur la ligne BD, au point qui divise cette ligne eu deux parties proportionnelles aux barres CB et OD, et que la plus petite des deux divisions soit placée du côté de la plus grande barre.

En effet, la courbure d'un cercle étant d'autant moindre que son rayon est plus grand, l'extrémité de la tige de jonction qui touche à la plus grande des deux barres est, pendant les oscillations, moins écartée de la position verticale que celle qui touche à la plus petite barre. Donc, pour conserver le point de suspension dans la verticale, il faut appliquer une correction d'autant plus petite que le rayon du cercle qui produit la déviation est plus considérable; et, par conséquent, le partage de la tige de jonction, dans le rapport qu'on vient d'indiquer, doit conduire à peu près au même résultat que la suspension au milieu de la tige, quand les deux barres sont égales entre elles.

Enfin une disposition qui tend à diminuer, dans tous les cas, les inexactitudes de l'appareil, consiste à placer les barres de telle sorte que la ligne verticale décrite par le point de suspension M, soit à égale distance des verticales extrêmes, entre lesquelles sont comprises les oscillations du système. C'est ce qu'on peut observer sur la *fig.* 58. B' et B'' représentent les points extrêmes des oscillations, et la verticale M'MM'' est placée à égale distance des verticales qui correspondent à ces deux points et au point B. Cette ligne doit naturellement être la plus favorable pour le point de suspension, puisqu'elle occupe déjà une position moyenne entre les verticales passant en B et en B', qui sont les points où l'écartement arriverait à son maximum, s'il n'y avait pas de tige de jonction.

On peut, d'après ce que nous venons de dire, s'expliquer comment les trois dispositions énoncées, savoir, l'emploi d'une tige de jonction entre deux barres égales, avec suspension au milieu, ou entre deux barres inégales avec partage dans le rapport inverse des barres employées, et le soin de placer la verticale de suspension à égale distance des verticales extrêmes de l'oscillation, doivent avoir pour effet de maintenir la tige du piston, à très-peu près, dans la direction verticale. Pour en avoir une explication ou des preuves plus positives, il faudrait soumettre le problème à un calcul analytique; mais, comme cette recherche exigerait des développemens trop étendus pour trouver place dans la description pratique que nous nous proposons en ce moment, nous nous contenterons de faire observer qu'on peut bien facilement vérifier ces résultats par une construction graphique très-simple.

Cette construction, représentée sur la *fig.* 58 pour le cas de deux barres égales, consiste à chercher quels sont les points occupés successivement par le point M, à mesure que le point B se trouve élevé ou abaissé par les oscillations du système. Pour cela, on tracera autour des points C et O deux cercles, des rayons CB et OD; puis supposant, par exemple, le point B parvenu en B', on décrira de ce dernier point un arc de cercle avec le rayon BD, et le point D', où cet arc coupera le cercle décrit du centre O, sera la position correspondante du point D. Le milieu M' de la ligne B'D' donnera la position analogue de M. On trouvera de même que M est la position du point M quand le point B parvient en B''; et, en fesant la même construction pour un nombre suffisant de points intermédiaires, on reconnaîtra que la ligne

suivie par le point M n'est pas mathématiquement une ligne droite verticale, mais qu'elle ne s'en écarte que d'une quantité tout-à-fait négligeable. Dans le cas de deux barres inégales, la solution du problème est, il est vrai, moins exacte; mais, avec l'amplitude ordinaire des oscillations du balancier d'une machine à vapeur, on la trouve encore tout-à-fait suffisante pour la pratique. La même construction graphique servira naturellement à reconnaître l'exactitude de tout autre disposition qu'on se proposerait d'essayer.

Le cas de trois barres seulement, que nous venons d'expliquer, est le plus simple qui se présente dans l'application; la *fig.* 59, *pl. VIII*, montre la disposition le plus ordinairement employée. CBA représente le grand balancier de la machine, qui doit porter en A et B deux tiges PQ et MN, qu'on veut maintenir dans la direction verticale. Pour cela, on applique d'abord au point B la disposition expliquée sur la *fig.* 58, c'est-à-dire que l'on établit au point O, situé hors de la machine, un pivot fixe sur lequel on monte une barre mobile ou *bride* OD, que nous supposerons égale à CB; puis, on joint les points B et D par une tige BD, sur laquelle on établit en M la suspension de la première tige MN. Celle-ci est donc exactement dans le cas de la *fig.* 58, et, par conséquent, elle se trouve maintenue dans la direction verticale prescrite. Ce premier point établi, on suspend en A une barre AP égale à BD, on joint les deux points P et D par une tige mobile égale à AB; et enfin, en suspendant au point P la seconde tige PQ, celle-ci se trouvera maintenue dans la verticale de la même manière que la première tige MN. En effet, les deux lignes AB et PD étant égales, ainsi que les deux lignes AP et BD, il est clair que la figure APBD sera toujours un parallélogramme, ou que les deux lignes AP et BD resteront constamment parallèles entre elles, quelle que soit la position du balancier. Cela posé, si l'on tire la ligne CD et qu'on la prolonge jusqu'à ce qu'elle coupe en E la direction de AP, il est évident que, puisque les lignes AE et BD sont toujours parallèles, les deux triangles BCD et ACE seront toujours semblables. Donc, dans toutes les situations successives du système, tous les points analogues de ces deux triangles occuperont des positions semblables. Ainsi, les milieux respectifs des deux lignes BD et AE, c'est-à-dire les points M et P, parcourront des lignes semblables et semblablement situées; et, par conséquent, enfin, puisque le point M parcourt, comme nous l'avons vu, une ligne droite verticale, le point P doit en parcourir une également. Toutes les dispositions employées pour les machines à vapeur peuvent d'ailleurs se rapporter à celle de la *fig.* 59, en renversant celle-ci, pour le cas des machines de bateaux à vapeur, où le balancier se trouve placé au-dessous de la tige à diriger. C'est pourquoi nous ne donnerons pas d'autres figures de ces appareils, dont on trouvera naturellement assez d'exemples dans les figures de machines que nous présenterons plus loin.

Les *guides parallèles* consistent simplement en deux tiges parallèles, entre lesquelles glisse la tête du piston. Pour cela, une traverse *d* (*fig.* 73 et 74, *pl. XII*) est fixée solidement au sommet de la tige D du piston. Cette traverse est terminée

à chaque bout par une douille d^{vi}, d^{vi}, garnie d'un étoupage qui embrasse la tige ou guide d^{v}, d^{v} ; et, à mesure que le piston monte et descend dans le cylindre, ces douilles, en glissant le long des guides, maintiennent la tête de la tige dans la direction précise qu'elle doit occuper. Ce moyen n'est guère en usage que dans les machines de petites dimensions ou dans les machines locomotives.

§ VI. *Du condenseur et de ses accessoires, ou de la pompe d'eau froide, de la pompe d'air et de la pompe d'eau chaude.*

Nous avons dit que dans les machines où l'on veut utiliser en totalité la force élastique de la vapeur, on produit, par la condensation, le vide d'un côté du piston, dans l'instant que la vapeur de la chaudière exerce son action utile sur la face opposée. Le vase où s'exécute cette opération se nomme le condenseur, et il doit nécessairement être muni de divers appareils, sans lesquels il ne pourrait fonctionner, savoir : la pompe d'eau froide, qui apporte l'eau employée à la condensation de la vapeur ; la pompe d'air, qui sert à retirer ensuite du condenseur l'eau qui s'y est produite, l'air dégagé de l'eau et la vapeur qui a échappé à la condensation ; et, enfin, nous y ajoutons aussi la pompe d'eau chaude, qui sert à enlever l'eau sortant de la pompe d'air, pour la faire passer, avant son refroidissement, dans la chaudière ou dans les réservoirs d'où celle-ci tire son alimentation.

Le *condenseur* (*fig.* 60, *pl. IX*) est un cylindre de métal A plongé en entier dans un bassin rempli d'eau froide, et au sommet duquel est adapté le tube d'éduction E, par lequel arrive la vapeur après qu'elle a terminé son action dans la machine. Vers le milieu de sa hauteur, la paroi de ce cylindre est traversée par un petit tuyau qui est terminé en *d*, par une plaque trouée comme une pomme d'arrosoir. Ce tuyau, qui plonge dans le bassin, est ouvert à sa partie inférieure *o*, de sorte que l'eau du bassin y entre librement et se trouve lancée en gerbe dans le condenseur, par l'excès de la pression atmosphérique sur la pression du condenseur ; mais un robinet qui intercepte le passage, et qu'on peut ouvrir plus ou moins au moyen de la poignée *r*, permet de régler la quantité d'eau ainsi injectée par l'orifice du tuyau. Au moyen de cette disposition, on conçoit qu'un vide presque complet existe toujours dans le condenseur, puisqu'il n'y peut pénétrer aucune vapeur qu'elle ne soit à l'instant condensée par le contact, avec la surface du métal et avec le jet d'eau froide qui s'échappe du tuyau *d*. Ainsi, chaque fois que, par l'ouverture des soupapes, un côté du cylindre à vapeur de la machine est mis en communication avec le tube d'éduction et le condenseur, la vapeur qui remplissait cette portion du cylindre se précipite aussitôt dans le condenseur, y est réduite à l'état liquide, et, par conséquent, un vide presque aussi parfait que celui du condenseur se produit immédiatement dans le cylindre de la machine. On remarque au bas du condenseur un petit tuyau *c* qui conduit audehors. Ce tuyau sert à *souffler* la machine, opération qui consiste à chasser l'air qui, pendant la suspension du travail, pénètre dans le condenseur et ailleurs. A cet

effet, ce tuyau est terminé par une soupape qu'on nomme *soupape à souffler*, et qui s'ouvre en dehors. Quand on veut remettre la machine en mouvement, on ouvre tous les passages en même temps, et la vapeur, parcourant avec rapidité toutes les parties de l'appareil, en expulse l'air qui s'échappe alors avec la vapeur, par la soupape *c*. Pour que cette soupape ne laisse pas rentrer d'air dans le condenseur, elle est recouverte d'une légère couche d'eau, qui la ferme hermétiquement.

La *pompe d'air*, représentée en B (*même fig.*), est, comme nous l'avons dit, employée à enlever du condenseur l'eau qui a servi à la condensation, la vapeur réduite à l'état liquide, celle qui peut avoir échappé à la condensation, et, enfin, l'air qui, étant contenu dans l'eau de la chaudière, avant sa vaporisation, s'en est dégagé au moment où celle-ci est passée à l'état de vapeur. Cette pompe consiste en un cylindre alésé, garni d'un piston à clapets, dont la tige traverse une boîte à étoupes ordinaire. Elle est mise en mouvement par une tige liée au grand balancier de la machine, de sorte que, quand celui-ci descend, il fait aussi descendre le piston de la pompe. Alors, il tend à se produire un vide au-dessus du piston, et une compression par-dessous. Par conséquent, le clapet de décharge *m*, qui conduit de la pompe au réservoir d'eau chaude M, et qui ne s'ouvre qu'au-dehors, se trouve fermé, par la pression de l'atmosphère sur l'eau contenue dans le réservoir M et par le poids de cette eau elle-même; en même temps le clapet de pied du condenseur *f*, qui ne peut s'ouvrir qu'en dedans, se trouve fermé et pressé sur son siége, par la compression exercée sous le piston; enfin, les clapets *n*, *n* du piston se soulèvent par l'excès de pression qui a lieu au-dessous du piston, comparativement au-dessus. Dans cette première action de la pompe, tous les liquides et les gaz contenus au fond de la pompe passent donc au-dessus du piston, à mesure que celui-ci descend. Ensuite, quand le piston remonte par l'action du grand balancier de la machine, il tend à se créer une compression au-dessus et un vide par-dessous. Ainsi, d'abord le clapet de pied *f* s'ouvre, et les produits liquides ou gazeux du condenseur passent de celui-ci dans la pompe d'air; en même temps les clapets *n*, *n* du piston se ferment, et les résidus amassés au-dessus du piston pendant sa descente précédente se trouvent enlevés vers le sommet de la pompe; enfin, le clapet de décharge *m*, comprimé par l'action du piston, s'ouvre en dehors et laisse se répandre, dans le réservoir d'eau chaude, l'eau, l'air et la vapeur non condensée, qui remplissaient la portion supérieure de la pompe. En redescendant, le piston puise de nouveau, au fond de la pompe, les liquides amenés du condenseur, et, en remontant, il les fait encore passer dans le réservoir d'eau chaude. Par conséquent, le condenseur se trouve continuellement purgé d'air et d'eau à mesure que la condensation tend à les y amasser, et l'action de la machine se continue sans obstacle.

La *pompe d'eau froide* est représentée en C sur la même figure. Cette pompe élève l'eau d'un puits, pour alimenter, au moyen du tuyau *h*, le réservoir d'eau froide qui entoure le condenseur. Comme c'est une pompe ordinaire, elle n'exige de

nous aucune explication spéciale. Elle est d'ailleurs mise en jeu par une tige attachée au grand balancier de la machine, et doit fournir au réservoir plus d'eau qu'il n'en requiert, de sorte que l'excès s'écoule continuellement par un tuyau de trop-plein.

La *pompe d'eau chaude* sert à enlever, du réservoir M (*fig.* 60), l'eau chaude qui s'y amasse et qui doit fournir l'alimentation de la chaudière. Ce réservoir, séparé d'ailleurs du bassin d'eau froide où est plongé le condenseur, reçoit, comme nous avons vu, l'eau élevée par la pompe d'air; et, comme cette eau provient du mélange de l'eau froide injectée dans le condenseur avec la vapeur amenée de la machine, on conçoit qu'elle doit conserver un degré de chaleur considérable et qui dépend surtout de la température ou de la pression de la vapeur pendant son action dans le cylindre à vapeur. Cette eau est donc encore très-chaude lorsqu'elle est reçue dans le réservoir M, et, par conséquent, elle est particulièrement propre à l'alimentation de la chaudière. C'est pourquoi elle est puisée du réservoir M, au moyen du tuyau D, par une pompe qui la fait passer dans la chaudière. Cette pompe, dont nous avons parlé déjà en expliquant les moyens employés pour alimenter la chaudière, est élévatoire quand la machine est à basse pression, et foulante quand la machine est à haute pression. L'excès d'eau chaude amené par la pompe d'air dans le réservoir M, s'écoule d'ailleurs par un tuyau de trop-plein.

Le condenseur, et les pompes qui en sont les accessoires, se construisent encore de plusieurs autres manières; mais on en trouvera des exemples dans les figures de machines que nous donnerons plus loin.

§ VII. *Des appareils régularisateurs pour les machines à double action, ou du volant, de la soupape à gorge et du gouverneur.*

Il est facile de voir que l'exacte régularité du mouvement est une condition essentielle du bon travail d'une machine. Il est donc nécessaire d'expliquer par quels moyens cette régularité est produite dans les machines à vapeur. Les appareils en usage pour parvenir à ce but sont différens, selon que la machine est à double ou à simple action; c'est pourquoi nous distinguerons avant tout entre ces deux genres.

Dans les machines à double action, qui sont presque toujours rotatives, la régularité du mouvement s'obtient au moyen du volant, de la soupape à gorge et du gouverneur, en s'aidant toutefois des indications du manomètre à mercure, comme nous le dirons un peu plus loin, en revenant sur le même sujet, considéré plus théoriquement.

Le *volant* (*fig.* 73, *pl. XII*) est une roue en fonte G, d'un très-grand diamètre, fixée sur l'arbre qui met en mouvement la machine, et tournant nécessairement avec lui. Le poids considérable de cette pièce, et, par conséquent, la difficulté de changer

sa vitesse de rotation une fois qu'elle est établie, font que les causes perturbatrices qui pourraient se produire dans la machine, comme un excès ou un défaut accidentels de vaporisation dans la chaudière, une diminution ou un surplus momentané de résistance dans le travail des ateliers, n'ont que des effets insensibles sur la vitesse du mouvement, parce que toute leur énergie se consume à ajouter ou à détruire, dans cette grande masse, une vitesse à peu près imperceptible. Cependant, on conçoit que l'inertie du volant ne peut remédier qu'aux causes perturbatrices de peu d'intensité ou de peu de durée, parce que si l'action de celles-ci avait une énergie ou une durée suffisante, elle finirait certainement par produire une modification dans la vitesse. Dans ce cas donc, le volant ne suffirait plus pour empêcher l'accélération ou la retardation du mouvement, et, par conséquent, on a dû recourir alors à d'autres moyens de régularisation.

La *soupape à gorge* (*fig.* 54, *pl. VIII*) qui sert à cet usage, est formée d'un disque circulaire *a*, mobile autour de son diamètre dans le tube que parcourt la vapeur pour se rendre de la chaudière au cylindre, et que l'on peut manœuvrer à la main au moyen d'une poignée qui sort au dehors, Lorsque ce disque est tourné exactement dans le sens de la longueur du tube, il n'oppose aucun obstacle sensible au passage de la vapeur, puisqu'il ne lui présente alors que son épaisseur, qui est presque nulle. Si le disque est, au contraire, tourné perpendiculairement à la direction du tube, comme il est d'un diamètre égal au diamètre intérieur de celui-ci, il en obstrue complétement l'ouverture, et, par conséquent, ferme entièrement le passage à la vapeur. Enfin, si le disque occupe une position intermédiaire entre les deux précédentes, il est évident qu'il obstruera une portion du passage plus ou moins considérable, selon qu'il se rapprochera plus ou moins d'être exactement perpendiculaire ou exactement parallèle à la direction du tube à vapeur.

D'après cette disposition, on conçoit que, si le passage laissé à la vapeur quand le disque est à moitié tourné, suffit pour laisser arriver dans le cylindre toute la quantité de vapeur nécessaire au travail régulier de la machine, on n'aura qu'à tourner ce disque plus ou moins, pour diminuer ou accroître la masse de vapeur qui peut arriver de la chaudière au cylindre, et, par conséquent, pour maintenir la vitesse de la machine au même degré, quoique la production de vapeur devienne plus grande dans la chaudière, ou la résistance du travail plus considérable dans les ateliers.

Pour que la variation de grandeur du passage de la vapeur soit opérée par la machine elle-même, on lie par des tiges de communication la poignée de la soupape à gorge à un appareil nommé *gouverneur* ou *modérateur à force centrifuge*, dont la construction est telle, comme nous allons le voir, qu'il ouvre ou ferme la soupape à gorge, juste en proportion du besoin et sans requérir aucune attention de la part du machiniste.

Le *gouverneur* (*fig.* 61, *pl. IX*) est composé d'un axe vertical *aa* mis en mou-

vement par l'arbre du volant, au moyen de deux roues d'angle ou d'une corde sans fin tournant dans une poulie à gorge *m*, et dont la vitesse est par conséquent toujours réglée par celle de la machine. Sur cet axe sont fixés deux bras *b*, *b*, qui tournent avec lui, et à l'extrémité desquels sont attachés des boulets de métal. Ces deux bras ou pendules, quoique entraînés par l'axe dans son mouvement de rotation, sont cependant articulés sur lui de manière à pouvoir s'en écarter, en se soulevant latéralement, comme on le voit sur la figure. Lorsque le volant de la machine est en mouvement, le gouverneur, d'après ce que nous venons de dire, tourne en même temps; par conséquent, les deux boulets sont éloignés de l'axe par l'effet de la force centrifuge, et se soutiennent dans cette position tant que dure le mouvement. Si dans ce moment la vitesse du volant vient à augmenter, les deux boulets s'écarteront davantage de l'axe, parce que la force centrifuge augmentera, et ils s'en rapprocheront au contraire si la vitesse vient à diminuer. D'autre part, un anneau ou collier mobile *c*, qui glisse librement le long de l'axe, est attaché par deux tiges *e*, *e*, aux bras du gouverneur, et quand ceux-ci sont soulevés par la force centrifuge, cet anneau est soulevé en même temps. Mais, au moyen d'un levier à fourchette *d*, qui embrasse l'anneau sans le serrer, et d'une suite d'autres leviers et de tringles qui communiquent avec la soupape à gorge, il arrive que le collier, en s'élevant le long de l'axe, tire la poignée de la soupape à gorge, et ferme en partie le passage de la vapeur. On voit donc que dès l'instant que la vitesse du volant devient plus grande, la soupape à gorge commence à se fermer, et que cet effet augmente toujours de plus en plus et à mesure du besoin, de manière à ne jamais laisser la vitesse de la machine s'accroître d'une quantité notable, au-delà du point fixé par le règlement de l'appareil. Par un effet contraire, si la vitesse de rotation du volant diminue, la soupape à gorge s'ouvre immédiatement et continue toujours de s'ouvrir de plus en plus, jusqu'à ce que la machine ait repris la vitesse qu'elle avait avant l'introduction de la cause perturbatrice du mouvement.

Pour régler le gouverneur, à l'origine du travail, on en détache d'abord la tige de la soupape à gorge. Puis, quand la pression dans la chaudière est à son point normal, et la vaporisation en pleine activité, on règle à la main l'ouverture de la soupape à gorge, de manière que la machine fasse, par minute, le nombre de révolutions voulues; et, quand on a reconnu que ce but est atteint, on maintient la soupape à gorge dans cette position, et on la fixe au gouverneur. La tige qui réunit les deux appareils se prête à cet ajustement et à tout changement analogue pendant le travail, parce qu'elle est composée de deux portions terminées par des pas de vis dirigés en sens contraire, et réunies par un écrou mobile; de sorte qu'en tournant celui-ci plus ou moins, on peut raccourcir ou rallonger cette tige à volonté et lui donner la longueur requise pour joindre la poignée de la soupape à gorge, quelle que soit la position de celle-ci. Une fois réglé ainsi, le gouverneur maintiendra toujours la même ouverture de la soupape à gorge, tant que la vitesse du volant ne variera pas; il l'augmentera

si la vitesse diminue, et la diminuera dans le cas contraire. Cependant, ces effets ne pourront se produire que dans certaines limites fort rapprochées, parce que si la vitesse de rotation devient trop considérable ou trop petite, les boulets, une fois parvenus à leur plus grand ou à leur moindre écartement possible, qui sont fixés par les arrêts *r*, *r*, cesseront d'agir sur le collier, et, par conséquent, sur la soupape à gorge. Dans ce cas, le machiniste sera donc obligé de détacher le gouverneur et de manœuvrer à la main la soupape à gorge, jusqu'à ce que la vitesse normale se soit rétablie.

Pour que la même vitesse du gouverneur puisse correspondre à diverses vitesses du volant, dans le cas où l'on voudrait régler la machine à un autre nombre de révolutions par minute, la communication de mouvement entre le volant et le gouverneur est opérée au moyen d'une poulie à plusieurs gorges de différens diamètres, ce qui permet de placer la courroie sans fin dans l'une ou l'autre de ces gorges, et de changer ainsi la vitesse relative des deux mouvemens.

§ VIII. *Des appareils régularisateurs pour les machines à simple action, ou de la soupape régulatrice et de la cataracte.*

Les machines à simple action ne sont presque jamais rotatives, et, par conséquent, on ne peut régulariser leur mouvement au moyen d'un volant. Mais, comme ces machines exigent deux espèces de règlement, dont l'un consiste à faire en sorte que le piston parcoure exactement la longueur fixée pour sa course, sans la dépasser ou s'arrêter auparavant, et l'autre, à obtenir de la machine qu'elle donne un nombre fixe de coups de piston par minute, on emploie, pour remplir ce double but, deux appareils que nous allons décrire successivement, et qui sont la soupape régulatrice et la cataracte.

La *soupape régulatrice* sert à régler la course du piston. C'est une soupape conique de la forme ordinaire, placée à l'extrémité du tube à vapeur, et que la vapeur doit nécessairement traverser avant de parvenir à la soupape d'admission du cylindre de la machine. On en voit une représentée dans la *fig.* 37, *pl. VIII*. *t* est le tube qui amène la vapeur de la chaudière, et *a* l'entrée du passage qui conduit à la soupape d'admission. La soupape régulatrice *r* est baissée ou soulevée par le levier *l*, qui passe dans un étrier *e* et dont le point fixe est en *o*. Ce levier est manœuvré par le machiniste, au moyen d'une tringle *m* et de deux écrous placés l'un au-dessus, l'autre au-dessous d'un piton fixe *n*, que traverse la tringle; de sorte qu'on peut, en tournant ces écrous, élever ou abaisser la tringle à volonté, et, par conséquent, augmenter ou diminuer à son gré l'ouverture de la soupape. D'un autre côté, nous avons dit que la vapeur doit nécessairement traverser la soupape régulatrice avant d'arriver à la soupape d'admission du cylindre. En continuant de laisser celle-ci ouverte pendant le même temps, on peut donc, en ouvrant plus ou moins la soupape régulatrice, laisser, pendant ce temps, entrer plus ou moins de

vapeur dans le cylindre. Par conséquent, si, par suite d'une variation accidentelle dans l'intensité du feu placé sous la chaudière, ou d'un changement momentané dans le travail des pompes, on trouve que le piston ne parcourt pas sa course tout entière, ou qu'il la dépasse au contraire et risque de frapper le fond du cylindre, il suffit d'augmenter ou de diminuer l'ouverture de la soupape régulatrice, pour faire arriver, à chaque coup de piston, un peu plus ou un peu moins de vapeur dans le cylindre, et pour obtenir, par conséquent, le règlement désiré.

Dans les machines qui n'ont point de soupape régulatrice, on règle la longueur de la course en élevant ou abaissant, sur la poutrelle mobile, le tasseau de percussion de la soupape d'admission, ce qui a pour effet de laisser cette soupape ouverte plus ou moins longtemps, pour la réception de la vapeur dans le cylindre. Ce moyen conduit également au but désiré, mais il a le désavantage d'être beaucoup moins commode et moins précis que celui que nous venons de décrire. La soupape régulatrice ne sert, du reste, que pour régler la course du piston exécutée par l'action de la vapeur. Quant à celle qui est opérée par l'effet du contre-poids, elle se règle par le déplacement des tasseaux correspondans, ainsi que nous le verrons quand nous parlerons plus au long du jeu de ces machines; mais, comme ce moyen de règlement n'exige la description d'aucun appareil particulier, nous n'en dirons rien en ce moment.

La *cataracte* sert à régler le nombre des coups de piston de la machine par minute. A cet effet, quand le piston a exécuté une course descendante par l'action de la vapeur, et une course remontante par l'effet du contre-poids, il ne recommence pas immédiatement à descendre, ainsi que cela aurait lieu si, immédiatement après son arrivée au sommet du cylindre, la soupape d'admission de la vapeur était, comme dans le cas ordinaire, ouverte par la percussion d'un tasseau fixé sur une tige remontante de la machine. En effet, alors, une nouvelle quantité de vapeur pénétrerait aussitôt dans le cylindre, et le piston exécuterait une nouvelle course descendante, qui serait de même suivie d'une course remontante, et ainsi de suite sans interruption. Mais, au lieu de cela, quand le piston est remonté au sommet du cylindre, la soupape d'admission continue d'être fermée, parce qu'il n'y a plus de tassseau de percussion pour l'ouvrir en frappant le cliquet. Tout reste donc dans le même état pendant un certain temps fixé par la cataracte, et ce n'est qu'après que ce temps est écoulé, que la cataracte soulève le cliquet, et, par conséquent, décroche le contre-poids, qui, en tombant, ouvre la soupape d'admission. Alors la vapeur pénètre de nouveau dans le cylindre, et fait exécuter au piston une nouvelle course descendante qui est aussitôt suivie d'une course montante. Puis, le piston attend de nouveau, pour repartir, que la cataracte détermine un renouvellement d'effet de la vapeur. On voit, ainsi, que cet appareil exécute le règlement de la machine, non pas en fixant la durée de ses instans d'action, mais en fixant au contraire la durée de ses intervalles d'inaction.

La cataracte se construit de plusieurs manières. On en voit une représentée dans la *fig.* 62, *pl. IX*. L'appareil consiste en un godet *a*, susceptible de faire la bascule autour d'un axe horizontal *c*. Dans ce godet coule continuellement un filet d'eau amené par le robinet *r*; et, au-dessous de l'axe, le pied du godet forme un levier coudé *bc*, auquel est attachée une chaîne qui communique au cliquet de la soupape d'admission de la vapeur. Quand le godet est vide, il se tient de lui-même dans la position verticale, par l'effet du poids du levier coudé et de la chaîne qui y est suspendue ; mais, à mesure qu'il se remplit d'eau on voit, d'après sa forme, que son centre de gravité s'éloigne de plus en plus de l'aplomb du point *c*. Après un certain temps, il arrive donc que le centre de gravité est suffisamment déplacé pour que le poids du godet et de l'eau qui le remplit entraîne le levier coudé, ainsi que la chaîne et le cliquet. Alors le godet se renverse en prenant la position ponctuée ; le cliquet se soulève, et, par conséquent, la soupape d'admission de la vapeur dans le cylindre est immédiatement ouverte par son contre-poids. Puis, dès que le godet est vidé, il se redresse par la prépondérance de la chaîne, et se trouve ramené contre la barre d'arrêt *n*. Le cliquet retombe donc à sa place, où, par l'effet de la machine, il accroche bientôt le contre-poids, et continue de maintenir la soupape fermée jusqu'à ce que le remplissage du godet produise de nouveau la chute d'eau dont l'instrument a reçu son nom. En ouvrant plus ou moins le robinet *r*, on peut, du reste, faire varier à son gré le temps nécessaire au remplissage du godet, et, par conséquent, on peut régler la machine au nombre des coups de piston que l'on veut par minute. Le tuyau *f* sert à l'écoulement de l'eau tombée du godet.

La cataracte moderne consiste en un petit corps de pompe qui se remplit d'eau pendant la course descendante de la machine, et qui se vide ensuite par un robinet particulier, de sorte que le plongeur ou piston de cette petite pompe redescend lentement, jusqu'à ce qu'étant parvenu au bas de sa course, il décroche, au moyen d'une tringle, le cliquet de la soupape d'admission de la vapeur, et détermine ainsi une nouvelle course du piston de la machine. Cette disposition est représentée dans la *fig.* 63, *pl. IX*. *p* est le corps de pompe qui est plongé dans une bâche remplie d'eau. Au-dessus de cette bâche s'élèvent deux montans verticaux *n*, qui soutiennent un petit balancier mobile autour de l'axe *h*. D'un côté, ce balancier supporte un contre-poids *i*, et agit sur le plongeur *k* du corps de pompe. De l'autre côté, il est manœuvré par une chaîne qui s'enroule sur une poulie *x*, et il agit sur la tringle verticale *m*, qui sert à ouvrir la soupape à vapeur de la machine. Sur l'axe de la poulie est fixé un long levier *l* qui, lorsqu'on le presse de haut en bas, enroule la chaîne sur la poulie, et relève le contre-poids *i*. Enfin, il y a, au fond du corps de pompe, une petite soupape *u*, qui s'ouvre du dehors au dedans, et, sur le côté une seconde soupape *v*, qui s'ouvre, au contraire, du dedans au dehors. Par cet arrangement, quand le plongeur monte, l'eau est aspirée, de la bâche dans le corps de pompe, par la soupape du fond, et, quand il redescend, l'eau repasse, au contraire, du corps de pompe dans la bâche,

par la soupape latérale ; mais un robinet ou diaphragme *z*, qui intercepte le tuyau de sortie et qu'on manœuvre au moyen de la tige *y*, permet de régler à son gré le temps nécessaire à l'eau pour ressortir du corps de pompe.

D'après cette disposition, l'action de la cataracte se comprend aisément. La tige de la pompe d'air porte un taquet qui, en descendant, appuie sur le levier *l*, le fait baisser, enroule la chaîne sur la poulie, relève le contre-poids, et, par conséquent, fait monter le plongeur *k*. Ainsi, pendant la course descendante du piston à vapeur, le corps de pompe se remplit d'eau. Ensuite, pendant la course remontante, le taquet se relève, et la cataracte est abandonnée à elle-même. Alors le contre-poids *i* commence à redescendre, mais lentement et à mesure seulement que l'eau, entrée dans le corps de pompe, peut en ressortir par l'ouverture du robinet *z*. En diminuant donc celle-ci, on peut augmenter à son gré le temps que le contre-poids met à descendre, ou celui que la tringle *m* met à remonter à son point le plus élevé. Il suit de là que lorsque le piston de la machine a terminé sa course montante, il s'arrête au haut du cylindre, parce que la tringle *m* n'est pas encore remontée tout-à-fait, et qu'il ne peut y avoir une nouvelle course descendante que cette tringle ne soit d'abord venue décrocher le cliquet de la soupape d'admission. Mais après un certain temps, le plongeur *k* arrive enfin au bas de sa course, et la tringle *m* au sommet de la sienne. Alors la tête de cette tringle, en heurtant le cliquet de la soupape, décroche son contre-poids; la soupape s'ouvre aussitôt, et le piston à vapeur commence à redescendre dans le cylindre. Le temps d'arrêt de la machine dépend donc de l'ouverture du robinet de la cataracte; et l'on voit que si l'on veut que la machine travaille sans interruption, il suffit d'ouvrir ce robinet de manière que la tringle des cliquets remonte dans le même temps que le piston à vapeur.

Au moyen des appareils que nous venons de décrire, on peut régler convenablement la vitesse de la machine, ou fixer le nombre de ses coups de piston par minute. Il faut, de plus, remarquer que ce règlement a l'avantage, en limitant à un taux voulu le nombre des coups de piston de la machine par minute, de réduire en même temps la consommation de combustible d'une manière proportionnelle. En effet, si l'on suppose une machine capable de donner dix coups de piston par minute, quand on n'emploie pas la cataracte, c'est-à-dire quand on ne met aucun intervalle entre les courses successives du piston, et qu'au moyen de la cataracte, on réduise cette machine à ne donner que cinq coups de piston par minute, puisque la dépense de vapeur est la même par coup de piston, avec la même charge, il est évident que quand la machine ne donnera plus que cinq coups de piston au lieu de dix, la dépense de vapeur par minute se trouvera réduite à moitié. Donc, le machiniste ne poussera son feu que pour obtenir cette vaporisation, car, sans cela, il y aurait perte permanente de vapeur aux soupapes de sûreté. Donc, enfin, l'effet immédiat de la cataracte est de diminuer la vaporisation de la chaudière, et, par suite, la consommation de combustible, en proportion du nombre des coups de piston. Et, si ces effets n'accompagnaient pas la

diminution de vitesse, il faudrait reconnaître que cet instrument serait bien peu satisfaisant, puisqu'il réduirait l'effet utile de la machine à moitié de ce qu'il était auparavant, tout en lui conservant cependant la même dépense de combustible. Mais nous n'insistons pas sur ce point, car il faudrait connaître bien peu l'action réelle des divers appareils qui composent la machine à vapeur, pour n'avoir pas aperçu l'influence de la cataracte sur la vaporisation de la chaudière.

§ IX. *Des appareils propres à mesurer les effets des machines, ou du compteur, du frein dynamométrique, de l'indicateur de Watt et de l'indicateur permanent.*

Enfin, après avoir décrit les différens appareils qui concourent à la construction ou à l'effet des machines à vapeur, il nous reste à dire quelques mots de ceux qui, sans faire précisément partie de ces machines, servent néanmoins à en constater les effets.

Le *compteur* est un instrument d'horlogerie qui sert à enregistrer le nombre des coups de piston donnés par la machine entre deux observations successives. Il consiste en une boite fermée, fixée sur le grand balancier de la machine et oscillant avec lui. Dans cette boite est placé un pendule court et pesant, qui n'est pas suspendu verticalement, comme celui d'une horloge ordinaire, mais qui est placé horizontalement, dans une direction perpendiculaire à celle du grand balancier. L'extrémité mobile de ce pendule repose sur une barre polie parallèle au balancier de la machine; et, chaque fois que celui-ci penche d'un côté, le poids du pendule le fait glisser sur sa barre de support, et il vient tomber du côté correspondant de cette barre. Quand, ensuite, le grand balancier se relève et penche du côté opposé, le pendule glisse de nouveau sur la barre de support et retourne à l'autre extrémité de cette barre. A chaque oscillation complète du grand balancier, le pendule exécute donc de son côté une oscillation complète et revient à son point de départ original. En outre, dans la boite du compteur, sont placées plusieurs roues dentées, garnies chacune d'un pignon qui engrène dans la roue suivante. Le nombre de dents des roues et des pignons est tel que chaque roue successive va dix fois moins vite que la précédente; de sorte que, tandis que la première roue fait un tour, la deuxième ne fait que $\frac{1}{10}$ de tour, la troisième $\frac{1}{100}$ de tour, et ainsi de suite. Enfin, chaque roue porte une aiguille et un cadran divisé en dix parties, et à chaque oscillation complète du grand balancier, la première de ces roues avance d'une dent, par l'effet du pendule.

On conçoit facilement que cet appareil doit enregistrer exactement le nombre des oscillations complètes du grand balancier; car, si ce nombre est moindre que 10, il se trouvera inscrit sur le premier cadran, et les autres n'auront pas encore parcouru une de leurs divisions tout entière. Si ce nombre excède dix, la première roue aura fait une révolution, et au delà; de sorte que l'aiguille de la deuxième roue aura parcouru une des divisions de son cercle, qui indiquera, par conséquent, les dizaines, tandis

que le premier cadran continuera d'indiquer les unités. Si le nombre des oscillations dépasse cent, la deuxième roue ayant exécuté une révolution entière, et au-delà, l'aiguille de la troisième roue aura parcouru une des divisions de son cadran, qui fera connaître les centaines, et ainsi de suite. Par conséquent, enfin, en relevant successivement tous les chiffres marqués par les cadrans successifs, on formera, sans aucune peine, le nombre définitif des oscillations complètes du balancier pendant le temps écoulé entre les observations. Sept ou huit cadrans successifs suffisent pour enregistrer le travail ordinaire de la plupart des machines pendant l'intervalle d'une année.

La boite du compteur est d'ailleurs fermée sous plusieurs clefs, confiées aux diverses personnes intéressées à le consulter, et les écrous qui la fixent au balancier sont renfermés dans la boite, de sorte qu'on ne peut la détacher sans l'ouvrir. Quelquefois le compteur n'est pas fixé sur le grand balancier de la machine; mais il est joint à celui-ci par une tringle qui produit les oscillations du pendule.

Le *frein dynamométrique* est dû à M. le baron de Prony. Il sert à reconnaître l'effort exercé par la machine, pendant son action. Cet appareil est représenté dans les *fig.* 64 et 65, *pl. IX*. Il consiste en un collier ou manchon en fonte *aa*, exactement centré sur l'arbre de la machine, et tournant avec lui. Ce collier est serré, au moyen d'une chaîne tirée par des écrous *d, d,* contre une semelle de bois dur *e*, fixée sur un levier de bois de sapin *l*, au bout duquel est suspendu un plateau de balance. En fesant travailler la machine sans aucune charge, mais serrant suffisamment les écrous *d*, *d*, on peut remplacer la charge par un frottement équivalent, ce qu'on reconnaît quand ce frottement a réduit la machine à faire le même nombre de tours par minute qu'avec sa charge ordinaire. Alors, en plaçant dans le plateau des poids capables de maintenir le levier horizontal, ou de tenir en équilibre le frottement du collier, ces poids indiquent l'effort exercé par la machine en marchant à la vitesse fixée.

Pour fixer le collier sur l'arbre de la machine, on forme d'abord autour de celui-ci une enveloppe cylindrique en bois *m*, solidement assujettie par des frettes, puis on y place le collier, qui est, à cet effet, composé de deux moitiés que l'on réunit au moyen des écrous *b*, *b*. De longues vis de rappel *c*, *c*, qui traversent des oreilles creusées en forme d'écrous et fixées au collier, permettent de le centrer exactement sur l'arbre; et, ensuite, il est calé, dans les intervalles des vis, avec des coins doubles, c'est-à-dire avec des coins enfoncés simultanément deux par deux, en sens contraire l'un de l'autre, de manière que la surface supérieure des deux coins reste bien parallèle à l'axe. Par ce moyen, le collier, qui est d'ailleurs soigneusement tourné en-dehors, présente une surface cylindrique exactement concentrique avec l'arbre de la machine. La semelle *e*, qui est destinée à produire le frottement, est assujettie au levier par des entailles, et elle est percée, ainsi que le levier, de plusieurs trous pour laisser passer l'huile nécessaire au graissage du collier. La chaîne, ou bande articulée, qui embrasse ce collier, est composée de mailles plates, formées de pièces de tôle réunies à charnière; ses extré-

mités sont attachées à deux boulons taraudés, qui traversent la barre du levier, et on la serre à volonté par les écrous *d*, *d*, qui sont garnis de rosettes, et qu'on manœuvre à la main, au moyen d'une clef. Enfin, comme le levier serait exposé à être enlevé par la rotation de l'arbre, si les écrous étaient trop serrés, ou à retomber, au contraire, si les écrous étaient trop libres, on place un peu au-dessus une traverse de bois bien assujettie, et un peu au-dessous un chevalet, qui limitent ainsi ses oscillations.

Une fois l'appareil monté, en plaçant d'abord, dans le plateau de balance, le poids probable qui représente l'effort exercé par la machine, puis manœuvrant avec précaution les écrous de la chaîne de pression, jusqu'à ce que le levier soit maintenu horizontal, ou du moins n'éprouve que de légères oscillations entre ses points d'arrêt, on fera prendre à la machine une certaine vitesse. Si cette vitesse est plus considérable ou plus faible que celle à laquelle on veut mesurer l'effort exercé, on ajoutera de nouveaux poids dans le plateau, ou bien on en retirera; et, quand on sera arrivé à voir la vitesse ou le nombre de tours voulus par minute, on fera le relevé des poids qui agissent sur le plateau, et ils donneront l'effort cherché. En effet, puisque le frottement de la semelle produit dans la machine la même vitesse régulière que sa charge normale, il s'ensuit que ce frottement est équivalent à cette charge. Mais, d'un autre côté, le poids P fait équilibre au frottement de la semelle, puisque si ce dernier était plus considérable, il enlèverait le poids, et s'il était plus faible, au contraire, il serait surmonté par lui, et le levier cesserait de se soutenir sans tomber. Donc, enfin, le poids P représente l'effort exercé par la machine à la vitesse voulue; il faut seulement avoir égard à deux conditions. La première, c'est que la vitesse de la machine, pendant l'expérience, ne doit pas être une vitesse accidentelle résultant des quantités de mouvement antérieurement communiquées aux masses, mais qu'elle doit être constante, comme celle acquise par la machine en faisant mouvoir sa charge, sans quoi on ne pourrait en conclure l'égalité des deux efforts : ainsi, il faudra s'assurer que la vitesse ne varie pas sensiblement pendant les observations. La seconde, c'est que le poids P doit comprendre, non seulement les poids placés dans le plateau, mais encore ce plateau lui-même, ainsi que l'effort exercé par la pesanteur sur le levier, au point *n*; et pour connaître ce dernier poids, on pourra enlever le levier au moyen d'un peson ordinaire attaché au crochet du plateau.

On aura donc ainsi l'effort exercé par la machine sur le point *n*. D'un autre côté, on sait que les efforts exercés par une machine sur les divers points où s'étend son action sont en raison inverse de la vitesse que tendent à prendre ces points dans le mouvement. On en conclura donc facilement l'effort exercé en tout autre point qu'on voudra. Ainsi, en nommant V la vitesse que tend à prendre le point *n*, en raison de sa distance à l'axe, et *v* la vitesse de la charge habituelle de la machine, on voit que l'effort exercé par la machine, pour mouvoir cette charge, aura pour expression

$$\frac{PV}{v}.$$

Enfin, comme l'effet utile d'une machine, dans l'unité de temps, est égal à l'effort utile qu'elle exerce, multiplié par la vitesse du point d'application de cet effort, l'effet utile de la machine aura nécessairement pour expression

$$\frac{PV}{v} \times v = PV.$$

Par exemple, si le poids total du plateau s'élève à 300 livres anglaises, la vitesse du mouvement à 30 tours de l'arbre par minute, et le rayon *sn* ou R à 10 pieds, la vitesse V aura pour valeur

$$V = 30 \times 3.1416 \times 2 \times 10 = 1885 \text{ pieds par minute},$$

et l'effet utile de la machine sera

$$PV = 300 \times 1885 = 565{,}500 \text{ livres élevées à 1 pied par minute.}$$

En même temps, si la vitesse du point d'application de la charge de la machine est de 200 pieds par minute, l'effort utile exercé pour mouvoir cette charge sera

$$\frac{PV}{v} = \frac{565{,}500}{200} = 2827.5 \text{ livres anglaises.}$$

On voit donc que l'appareil donnera, sans la moindre difficulté, soit l'effort utile exercé par la machine pour mouvoir sa charge, à la vitesse fixée, soit l'effet utile produit par la machine à la même vitesse.

Le frein dynamométrique, dont nous venons de parler, est très-commode pour mesurer l'effet utile des machines à vapeur de petites ou de moyennes dimensions; mais, pour celles dont les dimensions sont très-considérables, son usage présente de grandes difficultés, à cause du frottement énorme qu'il faudrait produire, pour faire équilibre à l'effort exercé par le piston. C'est pourquoi l'on doit alors recourir à d'autres instrumens.

L'indicateur de Watt, décrit précédemment, fait connaître, ainsi que nous l'avons expliqué, la pression effective moyenne exercée par la vapeur sur le piston de la machine pendant la durée d'une course. Comme cette pression n'est autre chose que l'effort exercé par le piston, il s'ensuit que l'instrument donne l'effort moyen appliqué par le piston pendant la course; ainsi, en multipliant cet effort par la longueur de la course, le produit sera la quantité de travail exécutée pendant cette course, et, en multipliant ensuite par le nombre des courses dans une minute, le résultat sera définitivement le travail produit par le piston de la machine par minute.

Par exemple, si la pression effective moyenne de la vapeur sur le piston a été reconnue de 15 livres par pouce carré, et si en même temps la surface du piston

est de 900 pouces carrés, la course de 8 pieds et le nombre des courses de 30 par minute, le travail produit par le piston sera

$$15 \times 900 \times 8 \times 30 = 3240000 \text{ livres élevées à 1 pied par minute.}$$

L'indicateur de Watt est donc un instrument du même genre que le frein dynamométrique, et sous ce rapport il devait être mentionné ici; mais, comme nous avons expliqué sa forme et son usage dans le § IV, art. II du chap. II, nous nous contenterons de renvoyer à ce qui a été dit alors. Nous ferons seulement observer que l'indicateur de Watt ne donne pas l'effet *utile* produit par la machine, mais seulement son travail brut, lequel comprend, dans l'effet produit, le frottement de la machine, puisque celui-ci fait nécessairement partie de l'effort surmonté par le piston. L'instrument n'a donc pas les mêmes avantages que le frein dynamométrique. En outre, il ne donne l'effet de la machine que dans une course déterminée du piston, et, par conséquent, ce n'est qu'en prenant des tracés d'indicateur à différentes périodes du travail, qu'on peut regarder leur résultat moyen comme exprimant avec quelque certitude le travail exécuté par le piston de la machine.

Enfin *l'indicateur permanent du travail* est un instrument inventé récemment dans le même but que les précédens, par M. le professeur H. Moseley, qui a certainement rendu par là un service que la science doit reconnaître. Cet instrument sert à mesurer le travail produit par le piston, à chaque instant, et à l'enregistrer d'une manière permanente, de manière à faire connaître la quantité définitive de travail qui a été produite par le piston de la machine, pendant un intervalle de temps d'une durée quelconque, d'après l'ingénieux principe établi par M. Poncelet et appliqué par lui à la construction des dynamomètres.

L'appareil consiste en deux petits cylindres de 4 pouces anglais de diamètre, communiquant l'un avec le sommet, l'autre avec le bas du cylindre à vapeur de la machine, et contenant chacun un piston. Ces deux petits pistons sont montés sur une même tige, qui se trouve ainsi poussée dans un sens par la pression de la vapeur en-dessus du piston de la machine, et dans le sens contraire par la pression de la vapeur en-dessous du même piston, et qui, par conséquent, supporte, en définitive, un effort pareil à celui qui est reçu et transmis par le piston à vapeur de la machine. Cette tige elle-même est fixée à un ressort en arc, de sorte que celui-ci se trouve pressé de la même manière que la tige, et que ses inflexions suivent exactement les efforts exercés par le piston de la machine.

D'autre part, une corde passant sur des poulies de renvoi et attachée à la tige du piston à vapeur, fait tourner un cône dont le mouvement se trouve ainsi exactement réglé sur celui du piston de la machine. Enfin, sur la tige des deux petits pistons est montée une roue, mobile à la manière d'une poulie ordinaire, mais qui ne peut glisser dans le sens de la longueur, et contre laquelle le cône se trouve constamment pressé par un ressort en spirale contenu dans son intérieur; de sorte que la roue, par l'effet du contact, tourne en même temps que le cône.

Il résulte de cette double disposition, que la roue dont il vient d'être question monte et descend le long du cône, selon que l'inflexion du ressort est plus ou moins grande. Mais, à mesure que cette roue monte le long du cône, elle se trouve, par la nature même de celui-ci, en contact avec des circonférences de plus en plus grandes. Donc d'abord, si le mouvement du cône était parfaitement uniforme, le chemin parcouru par la circonférence de la roue serait proportionnel à l'inflexion du ressort, ou à l'effort exercé par le piston à vapeur de la machine. De plus, nous avons vu que le mouvement du cône est réglé par celui du piston, d'où résulte que si, au contraire, la roue ne changeait pas de place sur le cône, le chemin parcouru par sa circonférence serait proportionnel à l'espace parcouru par le piston. Donc, en vertu des deux effets réunis, le chemin parcouru par la circonférence de la roue se trouvera à la fois proportionnel à l'effort exercé par le piston à vapeur et à sa vitesse ; c'est-à-dire qu'il sera proportionnel à leur produit, qui n'est autre chose que la quantité de travail exécutée par le piston. Il s'agit donc seulement de mesurer le chemin parcouru par la roue.

A cet effet, cette roue porte un pignon qui communique à un compteur semblable à celui que nous avons décrit plus haut, et, par conséquent, en lisant sur celui-ci le nombre des révolutions ou portions de révolutions exécutées par la roue, on a une expression du travail opéré par le piston de la machine pendant un intervalle de temps quelconque. Il convient d'ajouter que tout l'appareil est monté sur un châssis transportable, et que le cône mobile est placé sur ce châssis, de manière à présenter son arrête latérale parallèlement au mouvement longitudinal de la tige des deux petits pistons.

Cet instrument ne donne pas le travail *utile*, mais le travail brut, ou frottemens compris, de la machine, de la même manière que l'indicateur de Watt, que nous avons décrit précédemment. Comme il est assez compliqué et que son usage exige quelques calculs, nous nous sommes contenté d'en expliquer le principe ; nous renvoyons, pour plus de détails, à la description qui en a été publiée par M. Moseley dans la brochure intitulée : *Report of a Committee appointed at the tenth meeting of the British Association for the advancement of science*, *on the construction of a constant indicator for steam engines*. London, 1842.

CHAPITRE IV.

THÉORIE GÉNÉRALE DE LA MACHINE A VAPEUR.

ARTICLE I.

DES DIVERSES ESPÈCES DE MACHINES A VAPEUR, ET DES PROBLÈMES QUI SE PRÉSENTENT DANS LEUR APPLICATION AUX TRAVAUX INDUSTRIELS.

§ Ier. *Classification des machines à vapeur en usage.*

D'après ce que nous avons dit sur les propriétés de la vapeur dans le chapitre II, on conçoit que la force motrice qu'elle est capable de produire peut être appliquée et utilisée de plusieurs manières : d'abord, en introduisant la vapeur dans un cylindre, soit pour produire les mouvemens alternatifs d'un piston, par son action successive sur ses deux faces, ou sur l'une de ses faces seulement, soit pour produire immédiatement la rotation du cylindre lui-même ; ensuite, en utilisant simplement la force élastique de la vapeur, ou la pression qu'elle exerce contre tous les corps soumis à son action ; puis en utilisant également sa détente, ou la pression décroissante qu'elle continue d'exercer encore pendant sa dilatation graduelle dans la machine, et, enfin, en la condensant après qu'elle a effectué son action utile, afin de produire, autant que possible, le vide dans la partie du cylindre opposée à la nouvelle vapeur amenée de la chaudière. Ces divers modes d'application ou d'action de la vapeur ont donné lieu à plusieurs sortes de machines, que nous allons expliquer succinctement.

La manière d'appliquer la force motrice de la vapeur produit d'abord trois genres de machines, qu'il convient de distinguer, savoir : les machines à double action, les machines à simple action, et les machines à rotation immédiate.

On nomme machines *à double action*, ou machines à double effet, celles dans lesquelles la vapeur étant introduite dans un cylindre contre un piston mobile, agit successivement, comme force motrice, sur chacune de ses deux faces, et lui communique, par conséquent, un mouvement de va-et-vient. Dans ces machines, chacune des deux courses du piston est exécutée par l'action de la vapeur, et c'est ce qui leur a fait donner le nom de machines à double action.

Les machines *à simple action*, ou à simple effet, au contraire, sont celles où il n'y a qu'une seule course du piston qui soit exécutée par l'action de la vapeur; tandis que la course rétrograde est opérée par la chute d'un contre-poids, qui a été soulevé lui-même par l'action de la vapeur, pendant la course où celle-ci a servi de force motrice. Comme les machines à simple action ont en général un mouvement peu régulier, qui ne convient guère aux travaux industriels ordinaires, on ne les emploie presque jamais que pour l'épuisement de l'eau des mines, l'enlèvement des minerais ou l'approvisionnement d'eau des villes. C'est pourquoi le nom de machines à simple action et celui de machines *d'épuisement* sont à peu près synonymes; mais le premier est le seul qui exprime le système propre de la machine; le second n'indique que l'usage de la machine, et peut s'appliquer également à tout autre système.

Les deux espèces de machines que nous venons d'expliquer peuvent être *rotatives*, c'est-à-dire employées à produire un mouvement de rotation; et cet effet s'obtient en transformant, au moyen d'une manivelle, le mouvement alternatif du piston en un mouvement de rotation appliqué à un arbre à volant, qui met ensuite en jeu tous les outils nécessaires au travail de la machine. Ainsi, ce nom n'exprime qu'un emploi de la machine, et non un mode particulier d'utiliser la force motrice de la vapeur. Les machines à double ou à simple action peuvent, comme nous l'avons dit, être faites rotatives ou non rotatives; mais comme, dans la construction habituelle, les machines à double action ont un mouvement plus régulier que les machines à simple action, il arrive presque toujours que lorsqu'on recherche la régularité du travail, on emploie une machine à double action, et on la construit rotative ; et que, dans le cas où le mouvement peut être irrégulier sans inconvénient, on préfère une machine à simple action, et on la fait non rotative. C'est pourquoi, dans la pratique, on se sert presque indifféremment des noms de machine à double action ou machine rotative, et de ceux de machine à simple action ou machine non rotative. Mais, comme on voit des machines à simple action qui sont rotatives, il n'est pas exact d'employer ces expressions l'une pour l'autre.

Nous venons de dire que le nom de machines rotatives n'indique pas un mode spécial d'utiliser l'action de la vapeur. Il n'en est pas de même de celui de machines *à rotation immédiate*. On appelle ainsi les machines dans lesquelles le premier et immédiat effet de la vapeur est de produire un mouvement de rotation, au lieu d'un mouvement de va-et-vient du piston. On a vu que dans les machines rotatives, la vapeur agit d'abord sur le piston, pour lui communiquer un mouvement alternatif, et que celui-ci se transforme ensuite, au moyen d'une manivelle, en un mouvement de rotation appliqué à l'arbre du volant. Mais, dans les machines à rotation immédiate, il n'y a point de piston se mouvant en ligne droite, et alternativement d'une extrémité à l'autre du cylindre. La vapeur agit, soit sur un cylindre qui prend un mouvement de révolution sur lui-même, à la manière d'une vis

d'Archimède, soit sur une cloison mobile autour d'un axe, dans l'intérieur d'un tambour ; et, par ce moyen ou par tout autre semblable, elle communique immédiatement à l'axe un mouvement de rotation, qui est ensuite appliqué à mouvoir les outils de travail, comme dans toutes les autres machines. Ainsi, la différence entre les machines rotatives et les machines à rotation immédiate est que, dans les premières, il existe avant tout un mouvement rectiligne alternatif qu'il faut, pour rendre la machine rotative, transformer, au moyen d'une manivelle, en un mouvement de rotation, tandis que dans les secondes, ce mouvement de rotation est immédiatement produit sans transformation et sans l'intermédiaire d'une manivelle. L'idée de ces machines est venue à beaucoup d'inventeurs, parce qu'ils croient que, dans l'emploi de la manivelle, pour changer le mouvement alternatif du piston en un mouvement de rotation, il y a nécessairement une perte de force, à laquelle ils espèrent remédier. Mais l'on reconnaîtra, dans le calcul que nous présenterons bientôt, qu'à cela près des frottemens, la totalité du travail produit par la vapeur se transmet au mécanisme, et que la manivelle ne cause par elle-même aucune perte de force particulière. C'est donc un mal imaginaire que celui auquel on cherche ainsi à remédier, et les machines à rotation immédiate ne peuvent offrir d'avantages que par une plus grande simplicité de construction, qui réduirait leur prix d'achat et leur frottement. Mais, comme il n'y a encore aucune forme de ces machines qui soit consacrée par la pratique, et que nous voulons nous borner aux machines d'un usage habituel, nous ne nommons ici les machines à rotation immédiate que pour faire connaître la distinction des termes, et non dans le dessein d'en traiter plus au long dans le reste de cet ouvrage.

Les trois genres de machines que nous venons d'expliquer diffèrent, comme on le voit, par le mode d'application ou de transmission de la force motrice développée par la vapeur. Mais, en outre, il est clair que, dans chacun de ces genres, cette force motrice elle-même peut être produite de diverses manières, selon qu'on utilisera l'une ou l'autre des diverses propriétés qui résident dans la vapeur, savoir: sa force élastique, sa détente et sa condensation. Chacun des genres désignés plus haut peut donc donner lieu à une nouvelle classe de machines, suivant la combinaison qui y sera employée pour produire la force motrice. Ainsi, les machines peuvent être à haute ou à basse pression, à détente ou sans détente, à condensation ou sans condensation.

On dit en général qu'une machine est *à haute pression*, lorsqu'on y forme la vapeur sous une pression considérable dans la chaudière; et l'on dit au contraire qu'elle est *à basse pression*, quand la pression dans la chaudière n'excède la pression atmosphérique que de 3 ou 4 livres anglaises par pouce carré, ou de 0.25 ou de 0.30 kilogramme par centimètre carré. Néanmoins, on donne le nom spécial de *machine à haute pression* à une classe particulière de machines, dans lesquelles tout l'effet produit résulte de la haute pression de la vapeur qu'on y emploie, sans qu'on cherche à utiliser sa détente ni sa condensation.

On dit qu'une machine est *à détente* ou *expansive*, lorsqu'on y emploie la détente ou expansion de la vapeur, c'est-à-dire lorsque l'on intercepte l'arrivée de la vapeur de la chaudière avant la fin de la course du piston. Dans ce cas, la pression dans la chaudière doit toujours être plus considérable qu'il n'est nécessaire pour surmonter la résistance due au travail de la machine. La vapeur de la chaudière pénètre donc dans le cylindre avec un excès de pression, et elle tend d'abord à communiquer au piston un mouvement accéléré; puis, dès qu'on intercepte la communication entre les deux vases, la vapeur reçue jusqu'alors dans le cylindre commence à s'y détendre graduellement. Ainsi, elle presse de moins en moins le piston, et tend à laisser son mouvement se ralentir. Mais il résulte de cette pression, trop forte d'abord et trop faible ensuite, une pression moyenne durant la course, qui suffit pour exécuter le travail de la machine. D'un autre côté, comme on voit que la vapeur sort de la machine à une pression moindre que la résistance du piston, c'est-à-dire à une pression, et, par conséquent, à une température moindre que si cette vapeur avait agi pendant toute la course avec une intensité égale à la résistance, il est clair que la vapeur emporte avec elle, après avoir produit son effet, une moindre quantité de calorique que si elle avait été admise dans le cylindre pendant toute la course du piston. On comprend donc immédiatement qu'il doit résulter de cette cause une économie en faveur des machines à détente.

On appelle machines *sans détente* ou *non expansives*, celles où l'on ne fait point usage de la détente de la vapeur, c'est-à-dire dans lesquelles la vapeur de la chaudière pénètre librement dans le cylindre pendant toute la durée de la course du piston.

Enfin, les machines *à condensation* sont celles dans lesquelles la vapeur est condensée, avant de sortir de la machine; et les machines *sans condensation*, celles dans lesquelles la vapeur s'échappe librement dans l'air et sans être condensée, après avoir produit son effet dans le cylindre.

Ces distinctions étant établies, nous diviserons les machines à vapeur en trois genres, et chaque genre en plusieurs classes, selon les différences qui existent entre les divers systèmes en usage, les seuls dont nous nous occuperons dans cet ouvrage.

Le premier genre se composera des machines *à double action*, *sans détente*, comprenant, comme subdivisions, celles qui sont sans condensation et stationnaires, ou les machines à haute pression, proprement dites; celles qui sont sans condensation et se transportent elles-mêmes avec leur charge, ou les locomotives; et, enfin, celles qui sont à condensation, ou les machines de Watt à double effet. Toutes ces machines sont rotatives.

Dans le deuxième genre, nous placerons les machines *à double action*, *à détente*, qui formeront de même trois classes : celles à condensation et à détente dans un seul cylindre, ou les machines de Cornwall à double action; celles à condensation et à détente dans deux cylindres, ou les machines de Woolf; et, enfin, celles à détente sans condensation, ou les machines d'Évans. Toutes ces machines sont encore rotatives.

Dans le troisième genre, enfin, nous placerons les machines à ***simple action***, qui formeront encore trois classes : celles à basse pression, ou les machines de Watt à simple action; celles à haute pression, ou les machines de Cornwall à simple action; et celles où la vapeur n'agit que comme force accessoire, ou les machines atmosphériques. Ces trois espèces de machines ne sont pas rotatives, ou du moins ne le sont que très-rarement.

C'est en suivant cette classification que nous traiterons des diverses espèces de machines à vapeur, dans le cours de cet ouvrage. Nous donnerons d'abord une théorie générale de la machine à vapeur, qui s'applique immédiatement à toutes les machines à vapeur rotatives, ou aux deux premiers genres de machines, et qui, si elle n'inclut pas d'une manière absolue le troisième genre, ou les machines à simple action, sert du moins de fondation à leur théorie. Ensuite, nous passerons successivement aux développemens relatifs à chaque espèce de machines mentionnée plus haut.

§ II. *Des divers problèmes qui se présentent dans le calcul des machines à vapeur.*

Quand une machine à vapeur est construite, et qu'il est, par conséquent, déterminé, d'une manière invariable, si elle est à double ou à simple action, à haute ou à basse pression, à condensation ou sans condensation, et qu'en outre, la vaporisation de sa chaudière est maintenue constante par les soins du machiniste, on peut encore, néanmoins, modifier les effets qu'elle produit, en changeant, soit le degré de détente auquel on fait agir la vapeur dans le cylindre (si la machine est à détente), soit la vitesse que l'on fixe pour le mouvement, soit la charge que l'on impose à la machine; et, en outre, tous ces effets changeront eux-mêmes chaque fois qu'on fera varier, dans les limites possibles, la vaporisation effectuée dans la chaudière.

Il suit de là que, dans une machine construite, les données invariables sont le système et les dimensions de tout genre de la machine, et que les variables ou indéterminées sont la détente de la vapeur, la vitesse de la machine, sa charge et, enfin, la vaporisation actuellement opérée dans sa chaudière. Mais, parmi ces indéterminées, il en est une cependant qui est sujette à être fixée à priori; c'est la détente de la vapeur, puisque nous avons vu qu'il y a des machines où cette détente est nulle. Il faut donc, pour comprendre tous les cas, considérer successivement celui où la détente est fixée à l'avance, et celui où l'on peut la faire varier à volonté; et alors, il ne reste plus de variables totalement indépendantes que la vitesse, la charge et la vaporisation.

D'après ces considérations, on voit que l'on doit distinguer trois cas dans le travail d'une machine : celui où elle travaille à une détente donnée de la vapeur, et avec une vitesse, une charge ou une vaporisation *quelconques*; celui où elle travaille à une détente donnée, et avec la vitesse, la charge ou la vaporisation qui conviennent à la production de son *maximum d'effet utile, avec cette détente*; et enfin, celui où

la détente, ayant d'abord été réglée pour le travail le plus favorable de la vapeur dans la machine, on lui donne, en outre, la vitesse, la charge ou la vaporisation le plus avantageuses pour cette détente : ce qui produit, par conséquent, le *maximum absolu d'effet utile* pour cette machine.

Dans chacun de ces trois cas, on peut avoir à déterminer l'une quelconque des trois indéterminées, savoir : la vitesse, la charge ou la vaporisation. En outre, après la solution de ces trois problèmes, il s'en présente encore un quatrième, qui est un corollaire des premiers et qui consiste à déterminer l'effet utile de la machine, et cet effet utile lui-même peut s'exprimer sous plusieurs formes différentes, comme nous le verrons dans un instant. Il suit donc de là que les divers problèmes que l'on peut avoir à résoudre, pour chacun des trois cas indiqués ci-dessus, et pour les différentes espèces de machines, sont les suivans :

1°. Étant données la vaporisation et la charge d'une machine entièrement connue du reste, déterminer la vitesse que prendra la machine avec cette charge.

2°. Connaissant, au contraire, la vaporisation et la vitesse auxquelles on veut faire travailler la machine, déterminer la charge qu'elle pourra mettre en mouvement à la vitesse donnée.

3°. Connaissant la charge que doit mouvoir la machine, et la vitesse qu'elle doit imprimer à cette charge, déterminer la vaporisation dont doit être capable cette machine, et, par conséquent, les dimensions qu'il faut donner à sa chaudière, pour que les effets voulus soient produits.

4°. Connaissant toutes les données indiquées plus haut, déterminer l'effet utile que la machine produira, à une vitesse fixée ou avec une charge déterminée, sous les différentes formes qui suivent, savoir :

L'effet utile que produira la machine, exprimé en livres élevées à un pied, ou en kilogrammes élevés à un mètre par minute ;

Le même effet utile, exprimé en chevaux ;

L'effet utile que la machine produira par unité de poids de combustible ;

L'effet utile que la machine produira par pied cube ou mètre cube d'eau vaporisé ;

Le poids de combustible qui produira l'effet d'un cheval ;

Le volume d'eau vaporisé qui produira l'effet d'un cheval ;

L'effet, en chevaux, que produira la consommation d'une unité de poids de combustible ;

L'effet, en chevaux, que produira chaque unité de volume d'eau vaporisée.

Dans la théorie que nous allons développer, ces divers problèmes seront résolus dans les trois cas mentionnés plus haut. Dans les deux derniers cas, par conséquent, ils feront connaître la vitesse, la charge, la vaporisation et les effets qui correspondent au *maximum d'effet utile*, *relatif* ou *absolu*, de la machine.

Dans la théorie ordinaire des machines à vapeur, on n'avait jamais entrepris que de résoudre trois questions, savoir : déterminer la charge, la vaporisation et

l'effet utile (sous diverses formes), et nous avons vu que la solution en était fautive. Quant à la détermination de la vitesse pour une charge donnée, on n'en avait proposé aucune solution ; et la nature même de la théorie qu'on employait ne permettait pas de distinguer dans les machines l'existence des trois cas qui s'y rencontrent réellement. Il est donc possible que les énoncés que nous venons de présenter paraissent d'abord un peu obscurs, exprimés ainsi en termes généraux, et comportant des rapports sous lesquels on n'a pas coutume de considérer les machines ; mais ils s'expliqueront à mesure que nous entrerons dans la question, et l'on en verra à la fois la solution et l'indispensable nécessité, pour calculer d'une manière exacte, soit les proportions, soit les effets des machines à vapeur de tout genre et de tout système.

§ III. *De l'uniformité du mouvement dans les machines à vapeur.*

Nous avons, dans le chap. III, fait connaître les appareils au moyen desquels on régularise le mouvement des machines, soit à double, soit à simple action. Pour nous en tenir en ce moment aux machines rotatives à double action, que nous traiterons d'abord, ces appareils consistent dans le volant, la soupape à gorge, le gouverneur et le registre de la cheminée, et nous ajouterons de plus le manomètre à mercure, dont l'emploi n'est pas moins important pour cet usage, ainsi qu'on le verra bientôt. Ces instrumens ont été décrits ; mais, comme la théorie que nous allons présenter repose particulièrement sur l'établissement du mouvement uniforme des machines, et que l'effet réel de quelques-uns des appareils mentionnés plus haut a été mal compris, ce qui a contribué à introduire des erreurs dans la théorie ordinaire des machines à vapeur, nous expliquerons d'abord, avec plus de détails, par quels moyens, en réalité, ces appareils produisent l'uniformité du mouvement dans les machines.

Le volant est, comme nous l'avons dit, une roue très-pesante montée sur l'arbre de la machine. A l'origine du mouvement, le poids considérable de cette pièce, et, par conséquent, la difficulté qu'il y a de la faire passer du repos à la vitesse de rotation qu'elle doit avoir pendant le travail, présentent nécessairement un surplus de résistance à l'action de la vapeur. Ainsi, la machine ne prend d'abord qu'une vitesse très-faible ; mais, comme le machiniste a soin d'aider le premier effet de la vapeur, en poussant aux rais du volant, et que la vapeur continue de communiquer au piston de nouvelles impulsions, la machine finit par arriver à une certaine vitesse de régime qui dépend, d'une part, de la production de vapeur dans la chaudière, et d'autre part, de la résistance totale opposée au mouvement. Alors l'inertie du volant ne présente plus aucune résistance propre ; elle ne fait que maintenir l'uniformité du mouvement, par la quantité de travail qu'elle absorbe chaque fois que sa vitesse est augmentée, et par celle qu'elle développe chaque fois que sa vitesse est diminuée. En effet, si un surplus accidentel de vaporisation survient dans la chaudière, l'excès

de travail ainsi appliqué par la vapeur, tendra à augmenter la vitesse de la machine ; mais la portion considérable de ce travail qui sera absorbée par le volant, dès l'instant que sa vitesse commencera à s'accélérer, empêchera cette vitesse de s'accroître d'une quantité sensible. Et si, au contraire, c'est l'ouvrage exécuté par la machine qui offre momentanément un surplus de résistance, la vitesse tendra nécessairement à diminuer. Mais, comme alors le volant continuera toujours son mouvement en vertu de sa force d'inertie, il entraînera le mécanisme dans l'instant que la force motrice deviendra insuffisante, c'est-à-dire qu'il développera une certaine quantité de travail, laquelle, ajoutée à celle que continue de fournir la vapeur, maintiendra le mouvement presque aussi rapide qu'auparavant.

Le volant sert donc à régulariser le mouvement de la machine, en s'opposant à l'effet des causes perturbatrices dont l'intensité n'excède pas certaines limites; mais, s'il se produit, par exemple, dans la chaudière un excès de vaporisation continué pendant un temps suffisant, ou dans les ateliers un excès de résistance d'une intensité assez considérable, il est clair que la vitesse du volant, lente, il est vrai, à se modifier, finirait cependant par prendre le régime convenable à la nouvelle vaporisation ou à la nouvelle intensité de la résistance. Alors le volant ne suffira plus pour maintenir l'uniformité du mouvement de la machine, et la vitesse commencera peu à peu à augmenter ou à diminuer. Mais nous avons vu que sitôt que la vitesse du volant, et, par conséquent, celle du gouverneur, augmente ou diminue, la soupape à gorge commence à fermer ou à ouvrir de plus en plus le passage de la vapeur, et que cet effet se continue jusqu'à ce que la machine soit revenue à sa vitesse régulière. Dans ce cas donc, le gouverneur et la soupape à gorge commenceront à exercer leur action, et c'est leur influence qui rétablira l'uniformité du mouvement.

En effet, si l'on suppose qu'on ait, pour un instant, poussé le feu trop violemment, ou suspendu l'alimentation de la chaudière, ce qui, en supprimant une cause permanente de refroidissement, produit un effet semblable, il arrivera que la quantité d'eau vaporisée par minute dans la chaudière, augmentera. Cependant, comme dans le premier instant l'inertie du volant s'opposera à ce que la vitesse du piston s'accroisse d'une quantité sensible, la dépense de vapeur par le cylindre continuera d'être la même. Le premier effet de ce surplus de vaporisation sera donc que la vapeur non dépensée s'accumulera dans la chaudière. Mais, comme l'espace qui lui est réservé pour son accumulation est d'une étendue limitée, la densité de cette vapeur, et, par conséquent, aussi sa force élastique, croîtront en même temps; et cet accroissement de densité continuera tant que la vapeur de la chaudière ne pourra pas s'écouler en totalité, à mesure de sa formation. Si l'ouverture de la soupape à gorge restait invariable, ou si, rétrécie d'abord, elle était ensuite laissée au même point, il arriverait bientôt que toute la vapeur de la chaudière parviendrait à s'écouler dans le cylindre par cette ouverture, puisque, outre une plus grande vitesse de sortie due

à la pression, la densité croissante de la vapeur permet qu'il s'en écoule une quantité de plus en plus grande par le même orifice, et dans un temps donné. Ainsi, après le premier instant, la masse de vapeur admise dans le cylindre, et, par conséquent aussi, la vitesse du piston, deviendraient plus considérables. Mais comme, à mesure que la vitesse du mouvement tend à augmenter, l'orifice continue à se rétrécir de plus en plus, il est clair que malgré l'accroissement de densité de la vapeur dans la chaudière, et de sa vitesse d'écoulement, le mouvement de la machine se maintiendra néanmoins uniforme. Si la vaporisation, au lieu d'éprouver une augmentation, éprouve au contraire une réduction, ou, ce qui revient au même, si le travail exécuté par la machine présente momentanément un surplus de résistance, les effets opposés auront lieu. Dans ce cas, la réserve de vapeur dans la chaudière diminuera, et, par conséquent aussi, la densité de cette vapeur. Mais, comme le gouverneur ouvrira de plus en plus la soupape à gorge, le passage de celle-ci permettra l'entrée dans le cylindre d'un plus grand volume de cette vapeur, et ainsi la vitesse pourra être conservée sans altération.

La soupape à gorge, mise en jeu par le gouverneur, doit donc maintenir l'uniformité du mouvement, malgré l'excès ou l'insuffisance momentanés de la vaporisation dans la chaudière. Mais on voit que si cet effet se produit, ce n'est pas, comme le veut l'ancienne théorie, parce que la vapeur, en traversant un passage plus ou moins étroit, changerait de force élastique, ce qui est inadmissible, et arriverait dans le cylindre avec une pression plus ou moins grande, ce qui est également impossible, puisqu'il faut toujours que la pression dans le cylindre soit égale à la résistance du piston; mais que c'est réellement parce que la réserve de vapeur de la chaudière supplée alors à ce qui peut manquer à la force motrice, ou recueille au contraire ce que celle-ci produit de trop. Et, comme nous l'avons déjà dit ailleurs, le rétrécissement du passage n'est pas accompagné d'une diminution de pression dans le cylindre, mais bien d'une augmentation de pression dans la chaudière.

D'après ce que nous venons de dire, la soupape à gorge corrige les irrégularités du mouvement, en empêchant tout excès, ou au contraire toute insuffisance de vaporisation dans la chaudière, relativement à l'ouvrage à exécuter, d'agir sur la vitesse de la machine elle-même, et en les réduisant uniquement à accroître ou diminuer la réserve de vapeur renfermée dans la chaudière. Mais il est évident que si ces effets se prolongeaient pendant un temps suffisant, l'excès de vapeur amassée dans la chaudière et arrêtée par le rétrécissement continuel de la soupape à gorge ferait souffler la soupape de sûreté et se perdrait dans l'amosphère, et que dans le cas d'une insuffisance de production, la réserve de vapeur serait bientôt épuisée, de sorte que l'ouverture, même totale, de la soupape à gorge, serait sans effet, et que la vitesse du mouvement diminuerait. Pour empêcher la déperdition de vapeur dans le premier cas, et la diminution de vitesse dans le second, il fau-

dra donc que le chauffeur, en s'aidant pour cela du registre de la cheminée, diminue ou excite davantage son feu, selon le besoin; et c'est là, en définitive, la condition essentielle de la régularité du mouvement.

Mais, pour aider le machiniste à atteindre ce but, il y a encore un autre instrument non moins utile que les précédens : c'est le manomètre à mercure. Cet instrument, dont nous avons donné une description dans le chap. II de cet ouvrage, indique à chaque instant la pression de la vapeur dans la chaudière, ou dans le tube qui conduit de la chaudière au cylindre à vapeur. Lorsque la machine est en mouvement, c'est le devoir du machiniste d'examiner continuellement le manomètre, et de le maintenir, sans variation, au degré qu'il avait au départ de la machine. En observant les indications de cet instrument, on trouve, sans exception, que chaque fois que la pression baisse, si l'on ne laisse pas agir le gouverneur, la vitesse de la machine commence à diminuer, et qu'on ne ramène cette vitesse au degré convenable, qu'en fesant remonter la pression du manomètre au point fixé. C'est cette observation qui a contribué, sans doute, à confirmer l'opinion que la pression du manomètre, ou la pression dans la chaudière, doit représenter, à très-peu près, la pression de la vapeur dans le cylindre, c'est-à-dire la pression nécessaire pour surmonter la résistance du piston, puisque chaque fois que cette pression diminue, la force motrice paraît devenir insuffisante pour maintenir le mouvement. Et de cette opinion sont provenus les calculs erronés dont nous avons parlé dans le premier chapitre, et dans lesquels on regarde la pression dans la chaudière ou dans le tube à vapeur, comme représentant, à très-peu près, la pression motrice dans le cylindre. Mais la vérité est que ce n'est là qu'une interprétation fautive des faits. Si la vitesse de la machine diminue quand la pression baisse dans la chaudière, ce n'est pas, du moins sauf les cas particuliers, parce que la pression de la vapeur devient insuffisante pour surmonter la résistance; c'est parce que la diminution de pression dans la chaudière est un signe certain d'une diminution de vaporisation, et que cette diminution de vaporisation entraîne nécessairement une réduction de vitesse de la machine. En d'autres termes, si le manque d'attention du machiniste à entretenir le feu produit une diminution dans la vaporisation de la chaudière, il en résultera à l'instant deux effets simultanés : le premier, que la pression baissera dans la chaudière, parce que la vaporisation produite ne suffisant plus à la dépense, la réserve de vapeur diminuera dans la chaudière, et, par conséquent, sa pression baissera; et le second, que la vitesse de la machine se réduira en proportion de la vaporisation. Lorsqu'on attribue la diminution de vitesse à la diminution de pression, on fait donc l'erreur de prendre l'effet pour la cause; car la diminution de pression n'est ici qu'un effet de la diminution de vaporisation, et c'est celle-ci qui est la véritable cause. Et la preuve que la diminution de pression dans la chaudière n'est pour rien dans l'effet observé, c'est que la même machine qui travaille régulièrement à 40 livres, par exemple, de pression effective, par pouce carré dans la chaudière, et qui, lorsqu'on n'y fait pas usage du gouverneur,

diminue de vitesse sitôt que la pression baisse seulement à 39 livres, peut cependant, presque toujours, travailler tout aussi bien à une pression effective régulière de 20 livres par pouce carré, et même au-dessous, pourvu seulement que cette pression ait été la pression de départ de la machine. C'est ce que nous avons montré dans nos expériences sur les machines locomotives, et ce que l'on reconnaît plus facilement encore dans les expériences que nous avons rapportées § V, chap. I, sur une machine à haute pression et sur une machine d'Evans.

Pour se rendre compte de la manière dont ce dernier effet peut se produire, supposons que, dans une machine à haute pression, la résistance totale du piston, et tous frottemens compris, soit de 30 livres par pouce carré; ce qui, en retranchant la pression de l'atmosphère, qui, dans ces machines, exerce son action contre le piston, laisse une résistance effective de 15 livres environ par pouce carré. Dans ce cas, il est clair qu'une pression effective de 20 livres par pouce carré dans la chaudière sera plus que suffisante pour surmonter la résistance. Si donc, ayant fait monter la pression *effective* à 20 livres par pouce carré dans la chaudière, on met la machine en mouvement, il est évident qu'elle exécutera son ouvrage. Seulement, comme la pression dans la chaudière n'excédera que très-peu la pression dans le cylindre, la machine aura plus de peine à se mettre en mouvement à l'origine du travail, et elle sera plus sujette à se ralentir chaque fois qu'on négligera le feu, parce que la réserve de vapeur dans la chaudière sera peu considérable. Mais, à cela près, la machine travaillera très-bien à la pression effective de 20 livres par pouce carré; et, pourvu que la vaporisation dans la chaudière soit soutenue convenablement et sans variation, ce qu'on reconnaîtra au manomètre, la machine prendra et conservera la vitesse voulue pour le travail; car on sait que la chaudière peut vaporiser autant d'eau par minute, sous la pression de 20 livres par pouce carré, que sous toute autre pression.

Mais actuellement, supposons qu'on arrête la machine, et qu'après avoir laissé la pression effective dans la chaudière monter à 40 livres par pouce carré, on remette la machine en mouvement, elle exécutera son ouvrage comme auparavant. Seulement, dans le moment où l'on réglera le gouverneur pour avoir la vitesse convenable au travail régulier, il faudra, d'après ce que nous avons expliqué plus haut, fixer la soupape à gorge à une moindre ouverture que dans le cas précédent; parce que, outre une vitesse d'écoulement plus considérable, la vapeur à la pression effective de 40 livres par pouce carré ayant une densité beaucoup plus grande qu'à la pression de 20 livres par pouce carré, il n'en faudra qu'un moindre volume pour subvenir à la dépense du cylindre, à la vitesse fixée. Ainsi, la machine travaillera dans ce second cas, comme dans le premier, en ayant l'avantage, toutefois, de se mettre plus facilement en mouvement et de maintenir plus facilement sa vitesse. Mais l'on verra, dans le premier cas, la pression de la vapeur dans la chaudière être à-peu-près la même que dans le cylindre; et dans le second, la pression dans la chaudière être le double de la pression dans le cylindre.

Nous venons de dire que si, dans les deux cas considérés, la vitesse de la machine doit être maintenue la même, il faudra nécessairement que la soupape à gorge soit fixée à une moindre ouverture, dans le cas de la plus forte pression. Mais, si le travail de la machine n'exige pas impérieusement cette condition, comme cela arrive très-fréquemment dans des machines stationnaires que l'on fait quelquefois travailler à raison de 150 pieds, et d'autres fois à raison de 300 pieds par minute, pour le piston, et comme cela a toujours lieu dans les machines locomotives et dans les bateaux à vapeur, alors on pourra laisser la soupape à gorge ouverte, dans le second cas, au même point que dans le premier. Il en résultera que, pour maintenir la pression effective à 40 livres par pouce carré dans la chaudière, malgré la grandeur du passage de la soupape à gorge, il faudra augmenter considérablement la vaporisation; mais, si les dimensions du foyer et de la chaudière se prêtent à cette augmentation, ce qui est à croire d'après l'excès de puissance qu'on est, avec raison, dans l'habitude de leur donner, ou plutôt, si dans le premier cas considéré on s'était contenté de produire dans la chaudière une vaporisation très-modérée, il sera possible de remplir la condition voulue. Alors, dans les deux cas, la charge de la machine sera exactement la même, ainsi que l'ouverture de la soupape à gorge, et cependant, dans un cas, la pression effective dans la chaudière sera de 20 livres par pouce carré, tandis qu'elle sera de 40 livres par pouce carré dans le second. Ce sont précisément les résultats obtenus dans les expériences que nous avons rapportées dans le chap. I.

Il résulte donc de ce qui précède, que tout calcul fondé sur la pression dans la chaudière, pour en déduire la pression dans le cylindre ou les effets de la machine, est nécessairement appuyé sur une base fausse, ce que nous avons déjà établi par d'autres considérations dans le chap. I; que le manomètre à mercure n'est pas, comme on le croit, un instrument propre à faire connaître, ni par égalité, ni par proportion, la pression de la vapeur dans le cylindre, et que ce n'est pas pour conserver l'intensité nécessaire de la pression motrice, que le machiniste doit le maintenir constamment au même point; mais que c'est simplement un appareil indiquant toutes les variations de la vaporisation dans la chaudière, et que c'est pour connaître et corriger ces variations que le machiniste doit observer sans relâche ses indications.

Pour résumer ce que nous avons dit dans ce paragraphe, on voit que le volant suffit pour régulariser le mouvement, et rendre insensibles les inégalités de la vaporisation dans la chaudière, ou de la résistance du travail, toutes les fois que ces inégalités sont faibles ou de peu de durée; que si elles sont plus considérables ou plus longtemps continuées, la soupape à gorge en corrige alors les effets; qu'au delà d'une certaine limite cependant, ce mode devient encore insuffisant, de sorte qu'en définitive, le vrai moyen de régularisation de la vitesse consiste dans le soin du machiniste à entretenir le feu au degré d'intensité convenable; et qu'enfin ce résultat

est facilité par l'usage du registre de la cheminée, qui permet de régler le tirage du foyer, et par l'usage du manomètre à mercure, qui indique à chaque instant les variations que subit la production de vapeur dans la chaudière.

Ces développemens nous ont paru indispensables pour bien faire comprendre comment le mouvement uniforme s'établit dans les machines, et pour baser leur théorie sur les véritables causes qui déterminent leurs effets.

ARTICLE II.

DES EFFETS DES MACHINES, DANS LE CAS D'UNE COURSE D'ADMISSION DONNÉE, AVEC UNE VITESSE, UNE CHARGE OU UNE VAPORISATION QUELCONQUES.

§ I. *De la vitesse du piston avec une vaporisation et une charge données.*

Après avoir exposé d'une manière succincte, dans le premier chapitre de cet ouvrage, la manière dont nous concevons le mode d'action de la vapeur dans les machines, nous allons passer maintenant au développement complet de la théorie dont nous n'avons encore donné qu'une esquisse fort imparfaite, et à la solution des divers problèmes qui peuvent se présenter dans le travail ou dans la construction des machines à vapeur.

Pour embrasser immédiatement le mode d'action le plus complet de la vapeur, nous supposerons une machine travaillant par détente, avec une pression quelconque dans la chaudière, et avec condensation. Et, pour passer ensuite aux machines où l'on n'emploie pas la détente, ou bien à celles où l'on n'emploie pas la condensation, il suffira de faire, dans les équations générales, les suppressions ou les substitutions convenables.

Nous rappellerons avant tout que dans le § VI du chap. II, nous avons démontré que, pendant toute son action dans la machine, la vapeur reste continuellement à l'état de vapeur au maximum de densité pour sa température; et nous en avons tiré cette déduction, que quand la vapeur passe, dans une machine, d'un certain volume connu M' à un autre volume également connu M, et que sa pression varie en conséquence, et passe de la pression connue p' à une autre pression inconnue p, cette pression p peut se déterminer par la formule suivante :

$$p=\frac{M'}{M}(n+p')-n, \qquad (c)$$

dans laquelle la constante n a, selon le cas, les valeurs indiquées § IV, chap. II.

Cela posé, d'après ce que l'on sait déjà de la théorie proposée, la relation que nous cherchons entre les diverses données du problème se déduira de deux conditions générales : la première exprimant que la machine est arrivée au mouvement

uniforme, et, par conséquent, que la quantité de travail appliquée par la puissance est égale à la quantité d'action développée par la résistance; la seconde, qu'il y a nécessairement égalité entre la masse de vapeur dépensée par le cylindre et la masse de vapeur produite dans la chaudière.

Soient P la pression absolue de la vapeur dans la chaudière, et P' la pression moyenne qu'aura cette vapeur pendant son arrivée dans le cylindre, pression qui sera toujours moindre que P, excepté dans un cas particulier que nous traiterons plus loin; nous disons la pression *moyenne*, parce que, durant son admission dans le cylindre, la vapeur subira une certaine dilatation qui fera varier sa pression, celle-ci étant plus considérable au moment de l'ouverture du régulateur pour l'admission de la vapeur, qu'au moment de la clôture du même régulateur pour le commencement de la détente proprement dite. La vapeur pénétrera donc dans le cylindre à la pression P', et elle continuera d'affluer avec cette pression et de produire un effet correspondant, jusqu'à ce que la communication entre la chaudière et le cylindre soit interceptée. Alors, il cessera d'arriver de la vapeur nouvelle dans le cylindre, mais celle qui y est déjà parvenue commencera à se dilater pendant le reste de la course du piston, en produisant, par sa détente, une certaine quantité de travail, qui s'ajoutera à celle déjà produite pendant la période d'admission de la vapeur.

P étant la pression de la vapeur dans la chaudière, et P' la pression qu'elle prendra à son arrivée dans le cylindre, avant la détente, soit π la pression de cette vapeur en un point quelconque de la détente. Soient, en même temps, l la longueur totale de la course du piston, l' la course d'admission, ou portion de course parcourue pendant l'admission de la vapeur dans le cylindre, et λ la portion qui correspond au point où la vapeur a acquis la pression π. Enfin, soient encore a l'aire du piston, et c la liberté du cylindre, c'est-à-dire, l'espace libre qui existe à chaque bout du cylindre, au-delà de la portion parcourue par le piston, et qui se remplit nécessairement de vapeur à chaque course, cet espace, y compris les passages aboutissans, étant supposé représenté par une longueur équivalente du cylindre.

Si l'on prend le piston au moment où la longueur de course parcourue est λ, et la pression π, on verra que si le piston parcourt, en outre, un espace élémentaire $d\lambda$, le travail élémentaire produit dans ce mouvement sera $\pi a d\lambda$; car $d\lambda$ étant l'espace parcouru, et π la pression par unité de surface, πa sera la pression exercée sur toute la surface du piston, et, par conséquent, $\pi a \times d\lambda$ sera le travail correspondant.

Mais, d'un autre côté, puisque, dans l'instant que nous considérons, l'espace parcouru par le piston est exprimé par λ, il s'ensuit que, dans ce même instant, le volume $a(l'+c)$, occupé par la vapeur avant la détente, est devenu $a(\lambda+c)$. Donc, d'après l'équation (c) précédemment indiquée, il existe entre les deux pressions correspondantes P' et π, la relation

$$\pi = (n+P')\frac{l'+c}{\lambda+c} - n.$$

Or, en multipliant les deux membres de cette équation par $ad\lambda$, on en déduit

$$\pi ad\lambda = a(l' + c)(n + P')\frac{d\lambda}{\lambda + c} - nad\lambda.$$

Cette expression donnera donc la quantité de travail élémentaire produit par la détente, pendant que le piston parcourt l'espace $d\lambda$; et si l'on en prend l'intégrale entre les limites l' et l, on aura l'effet total produit par la détente de la vapeur, depuis le moment où elle est interceptée jusqu'à la fin de la course, savoir :

$$a(l' + c)(n + P')\log\frac{l + c}{l' + c} - na(l - l'),$$

expression où le logarithme indiqué est un logarithme hyperbolique.

Cette quantité exprimant le travail effectué pendant la portion de course durant laquelle il y a eu détente, en y ajoutant l'effet $P'al'$, produit pendant la partie antérieure l' de cette course, ou avant le commencement de la détente, on aura pour le travail total développé par la vapeur durant toute la course du piston,

$$a(l' + c)(n + P')\left(\frac{l'}{l' + c} + \log\frac{l + c}{l' + c}\right) - nal.$$

Mais la machine étant supposée parvenue au mouvement uniforme, le travail développé par le moteur doit être égal à celui qui est développé par la résistance. En représentant par R la pression totale exercée sur l'unité de surface du piston, en vertu de cette résistance, ou plutôt en vertu de toutes les résistances diverses qui ont lieu dans la machine, le travail qu'elle aura développé pendant une course aura pour expression

$$aRl.$$

Donc, on doit avoir la relation

$$a(l' + c)(n + P')\left(\frac{l'}{l' + c} + \log\frac{l + c}{l' + c}\right) - nal = aRl, \qquad \text{(A)}$$

qui est la première relation générale entre les diverses données du problème.

Cette équation exprimant que le travail développé par la puissance se retrouve en entier dans l'effet produit, on remarquera que, pour qu'elle ait lieu, il n'est pas nécessaire que le mouvement de la machine soit strictement uniforme. Il peut également être composé d'oscillations égales, partant chaque fois d'une vitesse nulle pour revenir à une vitesse nulle, pourvu que les oscillations successives aient lieu en temps égaux, et que les changemens de vitesse se fassent par degrés insensibles, de manière à éviter la perte de force vive.

On doit observer également que si, dans cette expression, on fait $l' = l$, ce qui

revient à supposer que la machine travaille sans détente, l'équation se réduit à $P' = R$: c'est-à-dire que, dans ce cas, la pression de la vapeur dans le cylindre sera égale à la pression de la résistance contre le piston ; et c'est, en effet, ce qu'on doit reconnaître *à priori*, car la seule force motrice appliquée par la vapeur, consistant alors dans sa pression constante sur le piston, il faut que cette force soit égale à la résistance, puisque sans cela le mouvement ne pourrait rester uniforme.

Nous venons d'obtenir la première relation générale entre les données et les inconnues du problème. Maintenant il s'agit d'obtenir une seconde relation résultant de l'égalité entre la production et la dépense de vapeur. Pour cela, si l'on exprime par S le volume d'eau vaporisé par la chaudière dans l'unité de temps, et transmis au cylindre, ce volume, en arrivant dans le cylindre, transformé en vapeur à la pression P', y deviendra, d'après la relation déjà énoncée (a),

$$\frac{mS}{n + P'}$$

Ce sera donc le volume de vapeur, à la pression P', fourni par la chaudière dans l'unité de temps, ou dans une minute, par exemple. D'autre part, $a\,(l' + c)$ étant le volume de cette vapeur qui se dépense par coups de piston, s'il y a K coups de piston par minute, la dépense par minute sera

$$Ka\,(l' + c).$$

Mais si l'on exprime par v la vitesse du piston par minute, on aura aussi $v = Kl$; ce qui donne $K = \frac{v}{l}$. Donc, la dépense ci-dessus sera

$$\frac{va\,(l' + c)}{l}.$$

Donc, puisqu'il y a égalité entre la production et la dépense de vapeur, on aura l'équation

$$\frac{mS}{n + P'} = va\frac{l' + c}{l}, \qquad \text{(B)}$$

qui est la seconde relation générale entre les données et les inconnues du problème.

Par conséquent, en éliminant P' entre les deux équations (A) et (B), on aura, pour la relation définitive cherchée,

$$v = \frac{S}{a}\cdot\frac{m}{n + R}\left(\frac{l'}{l' + c} + \log\frac{l + c}{l' + c}\right). \qquad \text{(I)}$$

Dans cette équation le logarithme $\log\frac{l + c}{l' + c}$ est un logarithme hyperbolique. Comme on sait que ces logarithmes se déduisent de ceux des tables, en multipliant (ces der-

niers par le nombre constant 2.302585, ou approximativement par le nombre 2.303, on pourrait remplacer le terme $\log \frac{l+c}{l'+c}$ par le suivant $2.303 \log \frac{l+c}{l'+c}$, dans lequel le logarithme serait alors un logarithme ordinaire. Mais, comme il existe, dans plusieurs ouvrages, des tables de logarithmes hyperboliques, et que, d'ailleurs, nous donnerons plus loin une table qui dispensera de toute recherche à cet égard, nous ne ferons ici aucun changement à la formule.

Cette équation est moins simple que celle à laquelle on parviendrait dans la même recherche, en supposant que, pendant toute son action dans la machine, la vapeur conserve sa température. Mais, cette dernière supposition, quoique ne produisant souvent que peu de différence dans les résultats définitifs du calcul, n'est cependant pas réellement exacte; puisqu'il est incontestable que, dans les machines ordinaires, la vapeur change de pression, et que les expériences dont nous avons parlé plus haut prouvent qu'elle change de température d'une manière correspondante. La dernière formule que nous venons de présenter a donc l'avantage de tenir compte, dans le calcul, de cette circonstance importante, et, par conséquent, de conduire à une plus grande exactitude dans les applications. Du reste, en détruisant dans l'équation (1) l'effet du changement de température, on obtient sans difficulté les formules qui conviennent à cette supposition.

En effet, nous avons vu (chap. II, § VI) que, pour passer d'un cas à l'autre, il faut, dans les formules déjà obtenues, faire

$$n=0 \text{ et } m=q\text{P},$$

en exprimant par q le volume spécifique de la vapeur sous la pression P. Alors l'équation de la vitesse devient

$$v=\frac{q\text{PS}}{a\text{R}}\left(\frac{l'}{l'+c}+\log\frac{l+c}{l'+c}\right);$$

et celle-ci, pour le cas des machines sans détente, ou pour $l'=l$, se réduit à la suivante :

$$v=q\frac{\text{S}}{a}.\frac{\text{P}}{\text{R}}.\frac{l}{l+c}.$$

Rien n'est donc plus facile que de passer d'une hypothèse à l'autre.

La quantité R que contient l'équation (1) est la pression résistante qui a lieu sur l'unité de surface du piston dans le mouvement. Mais cette pression résistante se compose évidemment de trois parties, savoir: la résistance provenant de la charge proprement dite, que nous appellerons r; celle provenant du frottement propre de la machine, que nous exprimerons par $f+\delta r$, en appelant f le frottement de la machine non chargée, et δ l'accroissement que subit ce frottement par unité de la charge r; et, enfin, la pression qui peut subsister sur la face du piston opposée à

l'arrivée de la vapeur, que nous représentons par p, cette dernière quantité p exprimant la pression atmosphérique, quand la machine est sans condensation, ou, seulement, la pression de condensation dans le cylindre, quand la machine est à condensation. Les quantités r, f, p et δ sont d'ailleurs rapportées, ainsi que R et P, à l'unité de surface du piston.

Dans les calculs relatifs aux machines locomotives, nous introduirons de plus trois termes : le premier pour exprimer la résistance de l'air contre le train en mouvement, force qui, croissant en raison du carré de la vitesse, ne pourrait être négligée sans erreur ; le deuxième pour représenter la résistance offerte par la machine elle-même dans le transport de son propre poids sur les rails ; et le troisième, enfin, pour tenir compte de la force dépensée par la machine à l'alimentation de son feu, au moyen de la *tuyère*, suivant le mode en usage dans ces machines. Mais, comme ces diverses circonstances ne se rencontrent pas en général dans les machines stationnaires, nous les omettrons en ce moment, et l'on pourra les introduire dans les cas particuliers où cela pourrait devenir nécessaire.

D'après ce qui vient d'être dit, la résistance R peut être remplacée par

$$R = (1 + \delta) r + p + f.$$

Nous substituerons donc cette valeur dans celle de v, et nous ferons en même temps, pour simplifier,

$$\frac{l'}{l'+c} + \log \frac{l+c}{l'+c} = k ;$$

expression qui, dans le cas de $l' = l$, c'est-à-dire dans le cas des machines sans détente, se réduit simplement au rapport

$$\frac{l}{l+c}.$$

Alors la valeur de v deviendra

$$v = \frac{S}{a} \cdot \frac{mk}{n+R},$$

ou

$$v = \frac{S}{a} \cdot \frac{mk}{n + (1+\delta) r + p + f}. \qquad (1)$$

Et si l'on remarque que la quantité

$$\frac{mS}{n+R}$$

n'est autre chose que le volume *absolu* occupé par la vapeur en contact avec le liquide sous la pression R, on reconnaîtra que, pour avoir la vitesse cherchée, il faut calculer le volume de vapeur qui correspond au volume d'eau S, supposé immédiatement transformé en vapeur sous une pression égale à la résistance R, diviser

ensuite ce volume par l'aire a du piston, et, enfin, multiplier le quotient par la quantité k, dont nous avons donné il y a un instant l'expression développée.

La formule (1) contient la relation générale entre toutes les données du problème; et c'est celle qui nous servira à résoudre successivement les différentes questions que nous nous sommes proposées. On remarquera seulement que l'homogénéité de la formule exige que les dimensions de la machine, ou les quantités a, l, l', soient exprimées en mêmes unités que le volume S de l'eau vaporisée, et que les pressions par unité de surface P, r et p soient également rapportées à la même unité que S : circonstance que nous mentionnons parce que, d'après les usages adoptés, ces diverses quantités sont ordinairement rapportées à des unités différentes, selon ce qui semble plus commode dans la pratique pour exprimer chacune d'elles.

Il faut encore ajouter que, d'après le mode même du raisonnement, il doit être entendu que la quantité S, qui entre dans l'équation, est la vaporisation *effective* de la machine; c'est-à-dire qu'elle représente le volume d'eau qui est réellement admis à l'état de vapeur dans le cylindre, et qui y a effet sur le piston. Si donc, par un mode de construction inhérent ou non au système de la machine, il se trouve qu'une portion de la vapeur produite s'échappe ou s'écoule sans agir sur le piston, cette portion ne doit pas être considérée comme comprise dans la quantité S, et ainsi doit être déduite avant tout calcul.

La formule que nous venons d'obtenir donnera la vitesse du piston pour une vaporisation et une charge r quelconques, lorsqu'on connaîtra les dimensions et les données diverses de la machine contenues dans l'équation. Cette formule est générale pour toute espèce de machine à vapeur rotative ou à un mouvement continu. Si l'on emploie la détente, il suffira de mettre pour l' la valeur correspondante au point de la course où la vapeur commence à être interceptée; si la machine n'est pas à détente, il suffira de faire $l' = l$. Si elle est à condensation, il faudra mettre pour p la pression de condensation; et enfin, si elle n'est pas à condensation, on mettra pour p la pression atmosphérique. Néanmoins, avant de faire ces déductions relatives aux différens systèmes de machines, nous allons continuer à chercher les formules générales pour tous les problèmes que nous nous sommes proposés.

Nous ferons remarquer cependant que la vitesse du piston, dans une machine donnée, est totalement indépendante de la pression à laquelle la vapeur se forme dans la chaudière, et qu'elle dépend essentiellement, au contraire, de la vaporisation S de la chaudière par unité de temps, et de la résistance totale $[(1+\delta)r+p+f]$ opposée au mouvement du piston.

§ II. *De la charge de la machine pour une vaporisation et une vitesse données.*

La relation que nous venons d'obtenir fait connaître, réciproquement, la résistance que peut mettre en mouvement une machine connue, avec une vaporisation et à une vitesse déterminées. En effet, il suffit d'en tirer la valeur de r ; ou plutôt, comme r

n'est que la résistance par unité de surface du piston, et qu'il convient d'avoir la résistance entière, on prendra immédiatement la valeur de $a \times r$, savoir :

$$ar = \frac{mkS}{(1+\delta)v} - \frac{a}{1+\delta}(n+p+f). \qquad (2)$$

D'après la forme de cette expression, il semble au premier aperçu, qu'en y fesant $v = 0$, c'est-à-dire, en supposant la vitesse nulle, on aurait pour résultat une charge infinie ; mais, en examinant plus attentivement la formule, on reconnaît bientôt qu'elle ne donne nullement ce résultat.

En effet, si l'on a $v = 0$, il faut aussi qu'on ait $S = 0$; car S est la quantité de vapeur qui traverse effectivement le cylindre dans une unité de temps, et une quantité quelconque de vapeur ne pourrait traverser le cylindre sans pousser le piston et sans créer, par conséquent, une vitesse quelconque pour la machine. Si l'on suppose la vitesse égale à zéro, il faut donc nécessairement qu'on ait en même temps $S = 0$. Mais, en fesant à la fois $v = 0$ et $S = 0$, on trouve

$$ar = \frac{0}{0},$$

et non pas $ar = \infty$, comme il le paraissait d'abord.

Ainsi, dans ce cas, la formule se réduit à la forme indéterminée; mais il faut observer que les formules exposées ne donnent les effets de la machine qu'après que le mouvement est parvenu à l'uniformité. Or, nous verrons bientôt que, pour une vaporisation donnée, la vitesse uniforme ne peut jamais être moindre que

$$v' = \frac{qS}{a} \cdot \frac{l}{l'+c},$$

puisque c'est celle qui correspond au passage de la vapeur dans le cylindre, à son état de plus grande densité, et qu'à toute autre densité, cette vapeur occuperait un volume plus considérable, et, par conséquent, ne pourrait traverser le cylindre dans le même temps, sans produire plus de vitesse. Toute supposition de vitesse moindre que celle-ci est donc inadmissible dans le problème, comme étant incompatible avec l'état d'uniformité de mouvement, pour lequel seul on calcule les effets des machines; et c'est pourquoi la formule se réduit à la forme indéterminée, c'est-à-dire ne donne pas de solution pour le cas de $v = 0$.

§ III. *De la vaporisation nécessaire pour produire une vitesse voulue avec une charge donnée.*

Pour trouver la vaporisation dont doit être capable ou que doit produire une machine, pour mettre en mouvement une certaine résistance r, à une vitesse connue v,

on tirera de la même équation (1) la valeur de S,

$$S = av \frac{n + (1 + \delta)r + p + f}{mk}. \qquad (3)$$

Cette équation donnera la quantité d'eau que la machine doit vaporiser et transmettre au cylindre par minute. Mais, comme la quantité S représente ici la vaporisation *effective*, dont doit disposer la machine, il est entendu que si la construction habituelle des machines dont on s'occupe, donne lieu à une certaine perte de vapeur, soit par les soupapes de sûreté, soit autrement, on en tiendra compte avec autant d'approximation que possible, et l'on ajoutera cette perte à la quantité S déduite de l'équation précédente, pour en conclure la vaporisation brute qui doit avoir lieu dans la chaudière.

Or il existe, dans les machines à vapeur, un effet qui a été fort peu étudié jusqu'ici, et qui a cependant une importance suffisante pour qu'on doive en tenir compte dans le calcul. Nous voulons parler de l'enlèvement de l'eau à l'état liquide et mêlée avec la vapeur. Cet effet est très-considérable dans les locomotives, puisque nous avons trouvé, par expérience, qu'il s'y élève moyennement à 0.25 de la vaporisation brute observée dans la chaudière. Nous en avons expliqué les causes relativement à ces machines. Elles tiennent à l'exiguïté de la chaudière et surtout de la place réservée à la vapeur, à la grandeur des passages réservés à la vapeur, à la pression ou à la densité considérable sous laquelle elle se forme, à la rapidité excessive de la vaporisation, et enfin aux oscillations continuelles de la machine.

Ces causes n'existent pas toutes dans les machines stationnaires; mais quelques-unes y subsistent encore d'une manière très-appréciable, et nous avons eu occasion de le reconnaître dans toutes les expériences que nous avons faites sur ces machines. C'est donc une circonstance qui appelle l'attention particulière des expérimentateurs, et nous ne prétendons nullement décider la question en ce moment; mais, à défaut d'observations plus précises, nous dirons que nous croyons pouvoir évaluer moyennement cette perte, dans les machines stationnaires, à 0.05 de la vaporisation observée; de sorte que la vaporisation effective moyenne serait les 0.95 de la vaporisation brute. Nous exceptons cependant les machines de *Cornwall*, dans lesquelles, comme nous le verrons plus loin, le réchauffement considérable du cylindre vaporise l'eau de suspension, pendant le travail même du piston.

§ IV. *Des diverses expressions de l'effet utile.*

1°. L'effet *utile* produit par la machine dans l'unité de temps, ou dans une minute, à la vitesse v, est évidemment arv, puisque ar est la charge mise en mouvement, et que v est l'espace parcouru par le piston, ou par la charge qu'il porte pendant une unité de temps. Par conséquent, en multipliant les deux membres

de l'équation (2) par v, on aura pour l'effet utile produit par la machine avec la vaporisation S, et à la vitesse v,

$$\text{E. u.} = arv = \frac{mkS}{1+\delta} - \frac{av}{1+\delta}(n+p+f). \qquad (4)$$

On peut encore l'exprimer en fonction de la charge, en multipliant par ar les deux membres de l'équation (1). Alors on aura pour l'effet utile que peut produire la machine avec la vaporisation S et la charge fixée r,

$$\text{E. u.} = arv = \frac{mrkS}{n+(1+\delta)r+p+f}. \qquad (4\ bis)$$

On remarquera que, dans une machine donnée, cet effet utile ne dépend pas de la pression à laquelle la vapeur se forme dans la chaudière, puisque la quantité P n'entre pas dans les expressions ci-dessus; mais qu'il dépend essentiellement de la vaporisation S effectuée par la chaudière dans l'unité de temps.

2°. Si l'on veut avoir la force en chevaux dont est capable la machine, à la vitesse v, ou quand on la charge d'une résistance r, il faut d'abord spécifier ce qu'on entend par *force d'un cheval.*

On estime en Angleterre qu'un cheval peut exercer un effort de 165 livres anglaises, à la vitesse de 200 pieds par minute, qu'on regarde comme la plus avantageuse pour le tirage; de sorte que l'effet utile produit par un cheval, par minute, est de 33000 livres élevées à 1 pied par minute. Ces nombres, rapportés aux mesures françaises, donneraient pour le cheval un effort de 76 kilogrammes à la vitesse de 60 mètres par minute, ou un effet utile de 4560 kilogrammes élevés à 1 mètre par minute, et il serait certainement très-avantageux d'avoir la même mesure, dans les deux pays, pour exprimer une même chose; mais l'usage a fait prévaloir dans les ateliers une mesure un peu différente. On estime en France qu'un cheval peut exercer un effort de 75 kilogrammes, à la vitesse de 1 mètre par seconde ou de 60 mètres par minute; ce qui donne, pour l'effet utile correspondant, 4500 kilogrammes élevés à 1 mètre par minute. Nous adopterons donc ce nombre, qui, du reste, ne diffère que de $\frac{1}{75}$ de celui admis en Angleterre, c'est-à-dire qui ne donne qu'une différence de un cheval un quart environ sur cent chevaux de force.

Ces effets utiles de 33000 livres élevées à un pied, ou de 4500 kilogrammes élevés à 1 mètre, par minute, sont désignés dans la pratique par le nom de *force d'un cheval par minute*; mais nous ferons observer qu'ils seraient, avec beaucoup plus de raison, désignés sous le nom de *effet d'un cheval par minute,* puisque ce sont des effets et non des forces, ou plus simplement encore sous le nom de *effet d'un cheval*, puisque la minute, étant l'unité de temps, se trouve naturellement sous-entendue dans le langage. Ce mode d'expression ferait disparaître une ambiguïté qui nuit beaucoup à l'intelligence de l'effet des machines, et ne produirait qu'un changement

bien léger dans les habitudes de la pratique. Comme un certain nombre de fois l'effet d'un cheval est égal à l'effet d'autant de chevaux, on dirait qu'une machine est de l'effet de tant de chevaux, au lieu de dire qu'elle est de la force de tant de chevaux. C'est le mode que nous suivrons dans le cours de cet ouvrage ; et si nous employons accidentellement l'expression de force de cheval, ce sera uniquement pour nous faire mieux comprendre des praticiens.

On se sert quelquefois aussi, dans les ateliers, de l'expression de *force de cheval par heure*. Cet effet utile n'est autre chose évidemment que 60 fois le précédent. Il a l'inconvénient de changer l'unité de temps, et, par conséquent, d'introduire une nouvelle difficulté dans l'intelligence des résultats. C'est pourquoi nous n'en ferons jamais usage d'une manière directe. Si, cependant, pour faire la comparaison de nos résultats avec d'autres connus, nous employons cette expression, elle devra être entendue dans ce sens : que la force d'un cheval, par heure, est égale à 60 fois l'effet utile d'un cheval par minute, ou à 60 fois ce que nous appelons *effet d'un cheval*.

Cela posé, pour exprimer l'effet utile d'une machine, en chevaux, il suffit évidemment de rapporter l'effet utile par minute, déjà obtenu dans l'équation (4), à la nouvelle mesure que l'on vient de choisir, et, par conséquent, de diviser l'effet produit arv par le nombre qui représente l'effet d'un cheval par minute.

L'effet utile, en chevaux, dont est capable la machine, avec la vaporisation S, et à la vitesse v ou chargée de la résistance r, sera donc,

$$\text{E.u.ch.} = \frac{arv}{33000}, \text{ en mesures anglaises;} \qquad (5)$$

$$\text{E.u.ch.} = \frac{arv}{4500}, \text{ en mesures françaises.}$$

3°. Nous venons, dans les deux questions précédentes, d'exprimer l'effet de la machine d'après l'effet total qu'elle est capable de développer, sans égard à sa dépense de consommation. Maintenant, nous allons, au contraire, faire entrer cette consommation dans la considération de l'effet produit.

L'effet utile que nous avons obtenu dans l'équation (4) est celui qui est produit par le volume S d'eau transformé en vapeur; et, comme ce volume d'eau S est vaporisé dans une unité de temps, le résultat est, comme nous l'avons dit, l'effet utile produit dans l'unité de temps, ou dans une minute, par la machine. Mais, si l'on suppose que pendant l'unité de temps, il se consomme N livres ou N kilogrammes de combustible, il est clair que l'effet utile produit par chaque livre ou chaque kilogramme de combustible sera la N^{ième}. partie de l'effet ci-dessus.

Donc, l'effet produit par la consommation de 1 unité de combustible sera

$$\text{E. u. 1 lb. co.} = \frac{arv}{N}, \text{ en mesures anglaises;} \qquad (6)$$

$$\text{E. u. 1 k. co.} = \frac{arv}{N}, \text{ en mesures françaises.}$$

Il suffira, pour appliquer cette formule, de connaître la quantité de combustible qui se consomme par minute, dans le foyer, c'est-à-dire, la quantité de combustible nécessaire pour produire la vaporisation S dans la chaudière. Cette donnée pourra être déterminée par une expérience directe sur la chaudière elle-même, ou par analogie avec d'autres chaudières d'une disposition semblable; mais, on devra tenir compte, avec grand soin, et de la qualité du combustible employé, et de la construction propre du foyer et de la chaudière.

4°. Nous avons vu plus haut que l'effet que nous avons indiqué par E.u., est celui qui est dû au volume d'eau S, effectivement transformé en vapeur. Si donc, nous voulons avoir l'effet utile qui sera produit par chaque unité du volume S, il est clair qu'il suffira de diviser l'effet total E.u., par le nombre d'unités qu'il y a dans S. Ainsi, l'on aura pour l'effet utile dû à la vaporisation effective de 1 pied cube ou de 1 mètre cube d'eau dans la machine,

$$\text{E.u.1 p.c.} = \frac{arv}{S}, \text{ en mesures anglaises;} \qquad (7)$$

$$\text{E.u.1 m.c.} = \frac{arv}{S}, \text{ en mesures françaises.}$$

5°. On a obtenu, il y a un instant, l'effet utile produit par livre ou par kilogramme de combustible. Il sera facile, par conséquent, de connaître le nombre de livres ou de kilogrammes de combustible qui représente un effet utile quelconque, comme, par exemple, l'effet d'un cheval par minute. En effet, il suffira d'une simple proportion, et l'on trouvera pour la quantité, en poids, de combustible nécessaire pour produire l'effet d'un cheval par minute,

$$\text{Q.co.pr.1 ch.} = \frac{33000\,N}{arv}, \text{ en mesures anglaises;} \qquad (8)$$

$$\text{Q.co.pr.1 ch.} = \frac{4500\,N}{arv}, \text{ en mesures françaises.}$$

Ces expressions donneront la quantité de combustible nécessaire pour produire l'effet utile indiqué dans les ateliers sous le nom de force d'un cheval par minute; et, par conséquent, pour produire l'effet utile désigné sous le nom de force d'un cheval par heure, qui est égal à 60 fois le premier, il faudra 60 fois la quantité de combustible obtenue par l'équation (8).

Nous revenons sur ce point, parce que pour faire connaître l'économie du travail des machines à vapeur, on a coutume d'exprimer qu'elles dépensent tant de livres ou tant de kilogrammes de combustible *par cheval par heure*, et non par cheval par minute. On a adopté ce mode d'expression, parce qu'on a trouvé que la dépense de combustible par cheval par minute serait une quantité trop petite pour pouvoir s'énoncer facilement. Mais il est évident qu'on arriverait au même résultat, en disant que la dépense de combustible de la machine est de tant de livres ou tant de kilo-

grammes par effet de 60 chevaux par minute, ou, si l'on veut, par effet de 100 chevaux; et ce mode d'expression serait à coup sûr beaucoup plus clair : car, lorsqu'on dit qu'une machine consomme tant de livres de combustible par cheval par heure, l'esprit est toujours en doute si les mots *par heure* s'appliquent au temps pendant lequel s'exerce la force d'un cheval, ou au temps pendant lequel on doit brûler le combustible. Pour éviter cette ambiguïté, et donner cependant des résultats comparables à ceux obtenus dans les ateliers, nous donnerons, quand il y aura lieu dans cet ouvrage, la dépense de combustible des machines par effet de 60 chevaux, et cette expression coïncidera avec celle qu'on indique sous le nom de force de cheval par heure dans la pratique.

6°. On trouvera également, par une simple proportion, que la quantité ou le volume d'eau qu'il est nécessaire de vaporiser pour produire le même effet d'un cheval par minute, sera

$$\text{Q.e.pr.1ch.} = \frac{33000\,\text{S}}{arv}, \text{ en mesures anglaises;} \qquad (9)$$

$$\text{Q.e.pr.1ch.} = \frac{4500\,\text{S}}{arv}, \text{ en mesures françaises.}$$

La quantité d'eau par cheval *par heure* serait 60 fois aussi grande.

7°. On peut encore demander quel effet en chevaux sera produit, soit par 1 livre, soit par 1 kilogramme de combustible; et c'est évidemment

$$\text{E.u.ch.pr.1lb.co.} = \frac{arv}{33000\,\text{N}}, \text{ en mesures anglaises;} \qquad (10)$$

$$\text{E.u.ch.pr.1k co.} = \frac{arv}{4500\,\text{N}}, \text{ en mesures françaises.}$$

8°. Enfin, l'effet en chevaux produit par la vaporisation de 1 pied cube ou de 1 mètre cube d'eau, sera de même

$$\text{E.u.ch.pr.1p.e.} = \frac{arv}{33000\,\text{S}}, \text{ en mesures anglaises;} \qquad (11)$$

$$\text{E.u.ch.pr.1m.e.} = \frac{arv}{4500\,\text{S}}, \text{ en mesures françaises.}$$

En mettant donc dans ces diverses équations, pour *arv*, sa valeur déterminée par la formule (4) ou (4 *bis*), on en déduira immédiatement la solution numérique des problèmes cherchés.

ARTICLE III.

DU MAXIMUM D'EFFET UTILE, AVEC UNE DÉTENTE OU UNE COURSE D'ADMISSION DONNÉE.

§ I. *De la vitesse du maximum d'effet utile.*

Les problèmes que nous venons de résoudre l'ont été dans toute leur généralité, c'est-à-dire en supposant que la machine met en mouvement une charge quelconque à une vitesse quelconque, avec la seule condition que cette charge et cette vitesse soient compatibles avec la vaporisation et les autres données de la machine. En construisant une machine pour un objet déterminé, ou pour mouvoir une certaine charge à une vitesse donnée, on ne doit jamais l'établir de manière qu'en accomplissant cette tâche, qui doit être sa tâche régulière, elle exerce le plus grand effort dont elle est capable; car alors il ne lui resterait plus de force en réserve pour parer aux circonstances fortuites, aux accroissemens de charge ou de frottement, etc., qui peuvent se présenter dans le service. D'autre part, le maximum d'effort de la machine, avec une détente donnée, correspondant, comme nous le verrons dans un instant, à son maximum d'effet utile, il s'ensuit qu'on ne peut espérer d'obtenir régulièrement de la machine son maximum d'effet utile, et qu'elle ne peut être construite dans cette prévision. Cependant il est nécessaire, quand une machine est construite ou à construire, de connaître quelle est la vitesse à laquelle elle produira ce maximum d'effet utile, et quels seront ses effets maxima; car ce n'est qu'en connaissant d'abord la limite possible des efforts de la machine, et faisant ensuite la part des circonstances fortuites, que l'on peut fixer d'une manière convenable la charge régulière qu'il est possible de lui donner, et se former une idée précise du surplus d'effort qu'elle sera capable d'exercer quand la nécessité s'en présentera.

Quelle est donc cette vitesse ou cette charge la plus avantageuse pour le travail, et quels sont les effets qui auront lieu, sous les différens rapports que nous avons envisagés plus haut, lorsque la machine sera effectivement placée dans ces circonstances avantageuses? Voilà ce qu'il nous reste maintenant à déterminer, d'abord en supposant la détente de la machine fixée à priori, ensuite en faisant varier cette détente elle-même pour obtenir encore un accroissement d'effet.

Pour connaître la vitesse qui correspond au plus grand effet utile, il suffit d'examiner l'expression de l'effet utile produit par la machine avec une vaporisation donnée, et sous une vitesse quelconque, savoir (équ. 4)

$$\text{E. u.} = \frac{mkS}{1+\delta} - \frac{av}{1+\delta}(n+p+f).$$

Comme la vitesse n'y entre que dans les termes négatifs, on reconnait à la première vue que, plus cette vitesse sera petite, plus, *pour une détente donnée*, ou

pour une valeur constante de k, l'effet utile de la machine sera considérable. D'un autre côté, en se reportant à l'expression de la vitesse de la machine sous une charge donnée, avant qu'on y ait mis pour P' sa valeur, savoir (équ. B),

$$v = \frac{mS}{a(n+P')} \cdot \frac{l}{l'+c},$$

on voit que la vitesse sera la plus petite possible sans perte de vapeur, quand P' sera le plus grand; et comme P', qui est la pression de la vapeur introduite dans le cylindre, ne peut en aucun cas excéder P, qui est la pression dans la chaudière, la condition du minimum de vitesse ou du maximum d'effet utile sera donnée par l'équation $P' = P$, ou

$$v' = \frac{mS}{a(n+P)} \cdot \frac{l}{l'+c}. \qquad (12)$$

Cette vitesse est celle du maximum d'effet utile, *pour la vaporisation donnée* S, qui figure dans l'équation; mais, on remarquera qu'en la substituant dans l'équation (4), on a, pour l'effet utile correspondant de la machine,

$$\text{E. u.} = \frac{mS}{1+\delta}\left(k - \frac{l}{l'+c} \cdot \frac{n+p+f}{n+P}\right);$$

et l'on voit, dans cette expression, que l'effet utile qui est le plus grand possible pour la vaporisation donnée S, continue néanmoins de croître encore avec les accroissemens de la quantité S; c'est-à-dire que, si la vaporisation donnée n'est pas la plus grande que puisse produire la chaudière, on pourra encore, en poussant le feu avec plus d'intensité, obtenir une augmentation d'effet. Il est donc entendu que ce n'est qu'en donnant dans cette équation à S la plus grande valeur possible, qu'on aura le maximum d'effet utile dont est réellement capable la machine.

En exprimant par q le volume de la vapeur sous la pression P, rapporté au volume d'un même poids d'eau, on peut, d'après l'équation (a) mettre l'équation (12) sous la forme

$$v' = \frac{qS}{a} \cdot \frac{l}{l'+c}. \qquad (12\ bis)$$

De cette manière, on évitera de calculer le terme $\frac{m}{n+P}$, la quantité q étant donnée par les tables du chap. II, dans lesquelles on la relèvera avec plus d'exactitude que par sa valeur approximative $q = \frac{m}{n+P}$. Cette observation s'appliquera de même à toutes les formules suivantes, où les quantités m et n resteraient réunies sous la forme $\frac{m}{n+P}$.

A l'égard de la formule qui précède, nous ferons remarquer que, mathématiquement parlant, la pression P' ne pourra jamais être tout-à-fait égale à P ; parce que, comme il existe, entre la chaudière et le cylindre, des conduits que la vapeur doit traverser, et que le passage de ces conduits forme un obstacle au libre mouvement de la vapeur, il doit nécessairement exister du côté de la chaudière un petit surplus de pression équivalent à la résistance de l'obstacle dont il est question, sans quoi le mouvement de la vapeur ne pourrait avoir lieu. Ce surplus de pression du côté de la chaudière empêchera donc que P' ne puisse devenir mathématiquement égal à P, et, par conséquent, la vitesse minimum de la machine sera toujours un peu plus grande que v'. En même temps, comme la pression P' indique la charge de la machine, on voit que cette charge sera, au contraire, un peu moindre que celle qui correspond à $P' = P$. Ainsi, le maximum d'effet, qui suppose cette condition, ne se réalisera jamais entièrement; mais, comme la différence entre P' et P, dans le cas dont il s'agit, c'est-à-dire la moindre différence possible entre ces deux pressions, est toujours fort petite en comparaison de la pression dans la chaudière, nous ne chercherons pas à introduire cette circonstance dans les calculs, qui en deviendraient plus compliqués sans être sensiblement plus exacts.

Pour revenir à la recherche qui nous occupe, le maximum d'effet utile sera donné par la condition $P' = P$, ou

$$v' = \frac{mS}{a(n+P)} \cdot \frac{l}{l'+c}.$$

C'est donc la vitesse à laquelle on doit faire travailler la machine, quand on veut en obtenir le plus grand effet possible; et l'équation $P' = P$ montre réciproquement que, quand cette vitesse aura lieu, la vapeur arrivera dans le cylindre à pleine pression, c'est-à-dire avec la même pression qu'elle avait dans la chaudière.

Il est nécessaire de faire remarquer aussi que cette vitesse du maximum d'effet, ou de pleine pression dans le cylindre, ne sera pas la même pour toutes les machines, et qu'au contraire, toutes choses égales d'ailleurs, elle variera en raison directe de la vaporisation S de la chaudière et en raison inverse de l'aire du cylindre. Elle pourra donc se trouver, dans une machine, moitié ou double de ce qu'elle serait dans une autre ; et cela fait voir qu'on aurait tort de croire que, parce que le piston des machines stationnaires ne dépasse pas, en général, une certaine vitesse de 0.80 à 1.50 mètre par seconde, ou de 150 à 300 pieds anglais par minute, la vapeur de la chaudière parvient nécessairement dans le cylindre sans changer de pression. Si l'on suppose que, dans une certaine machine, le maximum d'effet se produise à la vitesse de 200 pieds par minute, il ne sera pas difficile d'en établir une autre où le même effet aura lieu à une vitesse fort différente. Il suffira évidemment pour cela de conserver la même chaudière et de diminuer ou d'augmenter le diamètre du cylindre ; ou bien de conserver, au contraire, celui-ci en changeant les dimensions de la chaudière.

Bien plus, il suffira de laisser languir le feu, ce qui changera la vaporisation, et la vitesse de pleine pression variera en même temps.

Il n'y a donc d'autre moyen de connaître la vitesse du maximum d'effet utile ou de pleine pression d'une machine, que de la calculer directement pour cette machine; et c'est l'objet de la formule que nous avons donnée plus haut. Cette formule est d'ailleurs d'une simplicité remarquable et n'exige de connaissance expérimentale que celle de la production de vapeur dont est capable la chaudière. Quant à cette production de vapeur, on peut la déterminer par une expérience spéciale, ou la déduire de la surface de chauffe de la chaudière et de la qualité du combustible employé, en se fondant sur quelque expérience à ce sujet, faite, non sur la chaudière de la machine elle-même, mais sur quelque autre chaudière de construction semblable. Ainsi, la vitesse du maximum d'effet utile d'une machine peut toujours être connue à priori.

§ II *De la charge du maximum d'effet utile.*

Pour connaître la résistance utile que la machine est susceptible de mettre en mouvement à sa vitesse de maximum d'effet ci-dessus, il suffit, dans l'expression générale de la résistance, ou dans l'équation (2), de mettre pour v la valeur que nous venons de trouver; et l'on obtient pour la charge correspondante r',

$$ar' = \frac{a}{1+\delta} \cdot \frac{l'+c}{l} k(n+P) - \frac{a}{1+\delta}(n+p+f). \qquad (15)$$

En examinant la même équation (2) ci-dessus, qui donne la résistance dans le cas général, on voit que cette résistance est d'autant plus grande que la vitesse du mouvement est plus petite. La résistance que nous venons d'obtenir comme correspondant à la vitesse du maximum d'effet utile ou à la moindre vitesse sans perte de vapeur, est donc en même temps la plus grande résistance dont est capable la machine avec la détente donnée. Ainsi, le plus grand effet utile s'obtiendra en fesant marcher la machine à sa moindre vitesse pour la vaporisation donnée, et avec son maximum de charge, ce qui est d'ailleurs évident à priori.

On peut aussi trouver directement cette charge convenable à la production du maximum d'effet utile. Il suffit pour cela de considérer l'expression de l'effet utile en fonction de la charge, c'est-à-dire d'examiner l'équation (*4 bis*). On y voit que le maximum d'effet, pour une détente donnée, correspond au maximum de la fraction

$$\frac{mrkS}{n+(1+\delta)r+p+f},$$

qui, pour une vaporisation déterminée, ne contient de variable que r; et le maximum de cette fraction sera évidemment donné par le maximum de la résistance r. On retombe donc dans la même solution que ci-dessus.

On remarquera, du reste, que cette charge maximum de la machine fixée par l'équation (13) est tout-à-fait indépendante de la vaporisation de la machine, mais résulte expressément de la pression P dans la chaudière.

§ III. *Mode fourni par la recherche précédente, pour déterminer le frottement des machines non chargées, leur frottement additionnel par unité de la charge, et leur charge totale, lorsque celle-ci n'est pas connue par un calcul direct.*

La relation que nous avons obtenue plus haut peut servir à déterminer le frottement de la machine fonctionnant sans charge et son frottement additionnel par unité de la charge. En effet, on doit remarquer que, puisqu'il y a une charge maximum correspondante à chaque pression dans la chaudière, on peut faire, de toute charge quelconque, une charge maximum pour la machine, en baissant suffisamment la pression. Supposons donc qu'on ne donne aucune charge à la machine, mais qu'on baisse de plus en plus la pression dans la chaudière, au moyen de la soupape de sûreté, jusqu'à ce que tout ce que peut faire la machine soit de se maintenir elle-même en mouvement en surmontant son propre frottement. Avec cette pression réduite, le frottement seul de la machine deviendra pour elle une charge maximum. Soit donc P'' cette pression déterminée par l'expérience; l'équation précédente (13) aura lieu en y mettant P'' au lieu de P, et en y fesant en même temps $r=0$. Donc, on aura

$$f=(n+\mathrm{P}'')\frac{l'+c}{l}k-n-p,$$

et cette équation déterminera d'abord la quantité f, ou le frottement de la machine sans charge.

Pour avoir ensuite la quantité δ, on se servira d'un moyen analogue. Sans rien changer à la pression ordinaire de la machine, on augmentera sa charge de plus en plus, jusqu'à ce qu'on voie qu'elle s'arrêterait si on lui imposait une résistance plus considérable. Alors on sera parvenu à la charge maximum correspondante à la pression de la chaudière. Si donc on appelle r'' cette charge déterminée par l'expérience, P étant toujours la pression dans la chaudière, on voit que l'équation (13) donnera

$$1+\delta=\frac{1}{r''}\cdot\frac{l'+c}{l}(n+\mathrm{P})k-\frac{1}{r''}(n+p+f),$$

qui déterminera la quantité δ, ou le frottement additionnel que subit la machine par unité de la charge qui lui est imposée.

Si la charge de la machine n'était pas susceptible d'augmentation, au lieu d'accroître cette charge autant que possible, comme nous venons de le dire, on baisserait au contraire la pression dans la chaudière, jusqu'à mettre cette pression en

équilibre avec la charge ordinaire de la machine, et ce serait la valeur de P ainsi trouvée qu'il faudrait mettre dans l'équation, comme dans le cas où l'on fait fonctionner la machine sans aucune charge.

Les quantités f et δ étant ainsi déterminées, le frottement de la machine avec une charge quelconque r sera

$$F = f + \delta r.$$

Ces moyens sont ceux qui nous ont servi à déterminer le frottement des machines locomotives isolées ou suivies de leur charge, et nous les proposons de même à l'égard des machines à vapeur de toute espèce.

Enfin, le même procédé peut encore servir à évaluer la charge *totale* de la machine quand celle-ci n'est pas susceptible d'être déterminée par des calculs directs, comme cela arrive très-souvent. Il suffira pour cela de chercher quelle est la moindre pression de vapeur qui peut maintenir la machine en mouvement avec sa charge. En effet, soit P''' cette pression absolue; il s'ensuit que, dans ce cas, la machine travaillera avec son maximum de charge pour cette pression. Donc, l'équation (13) aura lieu en y mettant pour P cette pression, c'est-à-dire qu'on aura

$$(1 + \delta)\, r' + p + f = \frac{l' + c}{l}\, k\, (n + P''') - n.$$

Comme tout est connu dans le second membre, on aura sans difficulté la valeur de la quantité

$$(1 + \delta)\, r' + p + f,$$

qui est la charge *totale* de la machine, c'est-à-dire sa charge, y compris les frottemens et la pression de la vapeur non condensée sur la face opposée du piston. On verra plus loin que nous avons employé ce moyen pour déterminer la charge *totale* d'une machine à haute pression et d'une machine d'Evans; nous pouvons donc le proposer pour toute autre machine. Il a, sur le frein dynamométrique, l'avantage de n'exiger ni appareil, ni montage, ni dépenses; et l'on remarquera qu'il revient précisément à *peser* la charge dans une balance, puisque le grand balancier de la machine n'est autre chose qu'un fléau de balance ordinaire, dont l'une des extrémités supporte la pression de la vapeur comme un poids placé sur le plateau formé par le piston, et dont l'autre extrémité supporte le poids de la charge. Enfin, l'opération que nous avons indiquée pour arriver à l'équilible est précisément celle qui se pratique dans les arts pour peser les objets dont le poids est inconnu.

§ IV. *De la vaporisation de la machine.*

La vaporisation que doit avoir une machine, pour mouvoir une charge donnée r', ou pour prendre une vitesse voulue v', en produisant son maximum d'effet

utile, ou en travaillant de la manière la plus économique, avec les conditions prescrites, sera donnée par l'équation (3), en y faisant la substitution de r' et v', au lieu des valeurs générales r et v; ou, plus simplement, on la tirera directement de l'équation (12 *bis*), ce qui revient au même et donne

$$S = \frac{l' + c}{l} \cdot \frac{n + P}{m} av'. \qquad (14)$$

On remarquera qu'en substituant r' et v' au lieu de r et v dans l'équation (3), on aurait

$$S = av' \frac{n + (1 + \delta) r' + p + f}{mk};$$

mais, en y mettant pour r sa valeur, telle qu'elle est donnée dans l'équation (13), on retombe sur la formule précédente (14).

La vaporisation donnée par ces formules est la *moindre* que puisse avoir la machine pour mettre en mouvement la charge donnée r', ou pour travailler à la vitesse prescrite v'. Cela résulte évidemment de ce que l'effet $ar'v'$ est le plus grand qu'on puisse obtenir de la vaporisation S. Cette recherche fait donc connaître le moyen de faire exécuter à la machine une tâche déterminée, de la manière la plus économique; car la moindre vaporisation correspond évidemment à la moindre dépense de combustible.

§ V. *De l'effet utile maximum de la machine.*

Le maximum d'effet utile que peut produire la machine dans l'unité de temps, avec une détente donnée, sera connu par la formule générale (4), en y introduisant la vitesse convenable à la production de cet effet, ou se déduira du produit des deux équations (12 *bis*), (13), savoir :

$$\text{E. u. max.} = ar'v' = \frac{mS}{1+\delta}\left(k - \frac{l}{l'+c} \cdot \frac{n+p+f}{n+P}\right). \qquad (15)$$

On remarquera que cet effet utile maximum ne dépend nullement de l'aire du cylindre, ni de la vitesse ou du nombre des coups de piston par minute. Si l'on suppose une machine fonctionnant sans détente, ce qui revient à faire $l' = l$ et réduit l'expression k à la valeur $\frac{l}{l+c}$, on trouve même que l'effet utile maximum ne dépend plus de la longueur de la course du piston; car la quantité $\frac{l}{l+c}$, qui subsiste encore dans l'équation, n'exprime qu'un rapport, celui du volume parcouru par le piston au volume réel du cylindre. D'autre part, les quantités f et δ sont constantes dans une machine donnée, et varient très-peu entre les machines d'un même système ; les quantités n et q sont des nombres constans, comme on l'a

vu ; enfin, la pression de condensation p tient au mode de condensation employé, et surtout à la quantité et à la température de l'eau appliquée à produire la condensation , ce qui fait qu'elle est une constante, dans des conditions données. On peut donc dire que l'effet utile maximum d'une machine ne dépend essentiellement que de deux choses : la force de vaporisation S de la chaudière, et la pression P sous laquelle se forme la vapeur. Ce résultat doit d'ailleurs paraître évident à priori, car ce sont là les seules causes réelles de puissance. Quant aux dimensions du cylindre et de la course, elles ne sont que des moyens de transmettre cette puissance sous une forme ou sous une autre, mais sans pouvoir la créer ou la changer au fond; et, quant à la vitesse du piston, elle ne doit effectivement influer en aucune façon sur l'effet utile maximum , puisque, pour une production donnée de vapeur, cette vitesse peut prendre toutes les valeurs, selon le diamètre qu'on donne au cylindre.

L'effet en chevaux, de la machine, quand elle exerce son plus grand effort, ou qu'elle produit son maximum d'effet utile, pour une vaporisation donnée, sera, comme précédemment,

$$\text{E. u. m. ch.} = \frac{ar'v'}{33000}, \text{ en mesures anglaises;} \qquad (16)$$

$$\text{E. u. m. ch.} = \frac{ar'v'}{4500}, \text{ en mesures françaises;}$$

et, enfin, les autres modifications de l'expression de l'effet utile seront connues par les formules données pour le cas général, en y remplaçant seulement les quantités r et v par leur valeur actuelle r' et v'.

ARTICLE IV.

DU MAXIMUM ABSOLU D'EFFET UTILE.

§ I. *Détente qui produit le maximum absolu d'effet utile.*

Les recherches qui précèdent suffisent pour les machines où la détente est fixée à priori ; elles suffisent aussi pour les machines sans détente, parce que celles-ci retombent dans le cas des précédentes, et qu'il suffit alors de faire dans les formules $l' = l$, ce qui donne, en même temps, $k = \frac{l}{l + c}$. Mais il y a une recherche de plus dont nous devons nous occuper, pour les machines dans lesquelles on est libre de faire varier la détente à volonté.

Nous avons vu que, pour une détente donnée, le mode le plus avantageux de faire travailler la machine est de lui donner sa charge maximum que nous avons fait connaître plus haut, et qui peut se calculer à priori par l'équation (13). D'après cela,

pour chaque détente, on sait quelle est la charge à préférer ; mais, il s'agit maintenant, entre les diverses détentes qu'on peut donner à la machine, et chacune accompagnée de sa charge maximum correspondante, de trouver celle qui procurera le plus grand effet utile définitif.

Pour cela, il faut recourir à l'équation (15), qui donne l'effet utile maximum de la machine, avec une détente l', savoir, en y développant la quantité k,

$$\text{E. u. max.} = \frac{mS}{1+\delta}\left(\frac{l'}{l'+c} + \log\frac{l+c}{l'+c} - \frac{l}{l'+c}\cdot\frac{n+p+f}{n+P}\right),$$

et chercher, parmi toutes les valeurs qu'on peut donner à l', celle qui rendra cet effet utile un maximum ; or, en égalant à zéro le coefficient différentiel de cette expression, pris par rapport à l', on trouve, pour la condition du maximum cherché,

$$\frac{l'}{l} = \frac{n+p+f}{n+P}. \qquad (17)$$

Cette équation peut s'écrire comme il suit

$$\frac{l'}{l} = \frac{\frac{m}{n+P}}{\frac{m}{n+(p+f)}};$$

et sous cette forme, on reconnaît que le second membre n'est autre chose que le rapport des volumes spécifiques de la vapeur formée sous les pressions respectives P et $(p+f)$.

Par conséquent, pour connaître la valeur du rapport $\frac{l'}{l}$, qui produit dans la machine le maximum absolu d'effet utile, il faut chercher, soit au moyen de la formule (a), chap. II, § IV, soit au moyen des tables données chap. II, § III, le volume spécifique de la vapeur formée sous la pression P de la chaudière, puis ensuite le volume spécifique de la vapeur supposée formée directement sous une pression indiquée par la somme $(p+f)$; et le premier volume divisé par le second fera connaître la valeur cherchée de $\frac{l'}{l}$, c'est-à-dire, le rapport qui doit exister entre la portion l' de la course parcourue avant le commencement de la détente, et la course totale du piston, pour produire le maximum d'effet utile.

On voit aussi qu'en supposant $n=0$ dans cette relation, elle se réduirait à la suivante :

$$\frac{l'}{l} = \frac{p+f}{P}. \qquad (17\ bis)$$

Par conséquent, si l'on négligeait, dans le calcul des effets de la machine, l'influence du changement de température de la vapeur, la valeur du rapport $\frac{l'}{l}$, qui convient à

la production du maximum absolu d'effet utile, serait alors donnée simplement par le rapport entre les deux quantités $(p+f)$ et P. On peut donc regarder cette dernière équation comme une approximation de la précédente.

En introduisant la valeur de $\frac{l'}{l}$ donnée par l'équation (17), dans les formules de l'article III, on aura toutes les déterminations relatives à l'effet utile maximum que peut produire la machine avec cette détente; et puisque celle-ci est elle-même la détente la plus favorable pour la machine, il s'ensuit que ces déterminations seront celles qui correspondent au maximum *absolu* de l'effet utile qu'est capable de produire cette machine.

La seule remarque que nous ferons au sujet de cette recherche, c'est que la charge convenable à la production du maximum *absolu* d'effet utile, dans les machines à détente, n'est pas la charge maximum dont est capable la machine. En effet, si l'on se reporte à l'équation (13), qui représente la charge maximum avec une détente donnée, savoir, en y développant la quantité k,

$$ar' = \frac{a}{1+\delta}(n+\mathrm{P})\left(\frac{l'}{l} + \frac{l'+c}{l}\log\frac{l+c}{l'+c}\right) - \frac{a}{1+\delta}(n+p+f),$$

et que l'on cherche, par la différentiation, la valeur de l' qui en fera un maximum, on trouvera que cette condition est exprimée par $l'=l$, et non par

$$\frac{l'}{l} = \frac{n+p+f}{n+\mathrm{P}}.$$

Par conséquent, si l'on veut que la machine mette en mouvement la plus grande charge dont elle est capable, il faut la faire travailler sans détente ; mais cette charge n'est pas celle qui produit le maximum *absolu* d'effet utile. Celle-ci sera donnée par la solution de l'équation (4 *bis*), introduite dans la formule (13), comme on vient de le voir plus haut.

§ II. *Table pour la solution numérique des formules présentées dans les divers articles précédens.*

Comme les formules que nous venons d'obtenir, et celles qui vont suivre, contiennent des logarithmes hyperboliques, dont l'usage est peu commode, nous joignons ici une Table qui donnera sans calcul les élémens principaux des équations, et simplifiera considérablement toutes les recherches. Nous répéterons, néanmoins, que, si l'on n'avait pas cette Table sous les yeux, on y suppléerait facilement en cherchant, dans les Tables de logarithmes ordinaires, le logarithme du nombre $\frac{l+c}{l'+c}$, et multipliant ce logarithme par le nombre 2.303, ce qui donnerait son logarithme hyperbolique ; alors, les formules n'offriraient plus aucune difficulté.

Dans la table qui suit, nous avons supposé la liberté du cylindre $c = 0.05l$, comme cela a lieu dans les machines rotatives ou à volant, auxquelles nous nous bornons en ce moment. Dans les machines à simple effet, ou sans volant, dont nous parlerons plus loin, la liberté du cylindre, passages aboutissans compris, se fait souvent de 0.1 de la course, ou même plus, parce que le mouvement du piston n'étant pas limité par une manivelle, il y a plus de danger qu'il ne vienne à frapper le fond du cylindre.

TABLE *pour la solution numérique des formules* (*Machines rotatives*).

N°. I.

PORTION DE COURSE parcourue avant la détente, ou valeur de la fraction $\frac{l'}{l}$.	VALEUR correspondante de k, ou de l'expression $\frac{l'}{l'+c} + \log\frac{l+c}{l'+c}$. pour $\frac{c}{l} = 0.05$.	PORTION DE COURSE parcourue avant la détente, ou valeur de la fraction $\frac{l'}{l}$.	VALEUR correspondante de k, ou de l'expression $\frac{l'}{l'+c} + \log\frac{l+c}{l'+c}$. pour $\frac{c}{l} = 0.05$.	PORTION DE COURSE parcourue avant la détente, ou valeur de la fraction $\frac{l'}{l}$.	VALEUR correspondante de k, ou de l'expression $\frac{l'}{l'+c} + \log\frac{l+c}{l'+c}$. pour $\frac{c}{l} = 0.05$.
0.10	2.613	0.39	1.755	0.68	1.295
0.11	2.569	0.40	1.735	0.69	1.282
0.12	2.527	0.41	1.716	0.70	1.269
0.13	2.485	0.42	1.697	0.71	1.257
0.14	2.446	0.43	1.678	0.72	1.245
0.15	2.408	0.44	1.660	0.73	1.233
0.16	2.371	0.45	1.642	0.74	1.221
0.17	2.336	0.46	1.624	0.75	1.209
0.18	2.301	0.47	1.606	0.76	1.197
0.19	2.268	0.48	1.589	0.77	1.186
0.20	2.235	0.49	1.572	0.78	1.175
0.21	2.203	0.50	1.555	0.79	1.164
0.22	2.173	0.51	1.539	0.80	1.152
0.23	2.142	0.52	1.523	0.81	1.141
0.24	2.114	0.53	1.507	0.82	1.131
0.25	2.085	0.54	1.491	0.83	1.120
0.26	2.059	0.55	1.476	0.84	1.109
0.27	2.032	0.56	1.461	0.85	1.099
0.28	2.006	0.57	1.445	0.86	1.088
0.29	1.980	0.58	1.431	0.87	1.078
0.30	1.955	0.59	1.417	0.88	1.067
0.31	1.931	0.60	1.402	0.89	1.057
0.32	1.908	0.61	1.388	0.90	1.047
0.33	1.884	0.62	1.374	0.91	1.037
0.34	1.862	0.63	1.361	0.92	1.027
0.35	1.840	0.64	1.347	0.93	1.017
0.36	1.818	0.65	1.334	0.94	1.007
0.37	1.797	0.66	1.321	0.95	1.000
0.38	1.776	0.67	1.308		

CHAPITRE V.

MACHINES A HAUTE PRESSION

OU

MACHINES A DOUBLE ACTION, A HAUTE PRESSION, SANS DÉTENTE ET SANS CONDENSATION.

ARTICLE I.

DESCRIPTION DE LA MACHINE.

Nous venons de donner, dans le chapitre précédent, la théorie générale des effets de la vapeur agissant dans le cylindre d'une machine, tant pendant son admission directe de la chaudière que pendant sa détente dans le cylindre, après sa séparation de la chaudière. Cette théorie, et les formules que nous en avons déduites, forment la base de tous les calculs que peuvent exiger les applications particulières de la vapeur; et il ne nous reste plus maintenant qu'à en montrer les modifications suivant chaque système de machine ou chaque mode en usage pour utiliser l'action motrice de la vapeur.

C'est ce but que nous nous proposerons dans ce chapitre et dans les suivans.

Les machines à haute pression proprement dites, par lesquelles nous allons commencer, sont des machines à *double action* ou *rotatives*, *à haute pression*, *sans détente et sans condensation*. La vapeur y est d'abord formée, dans la chaudière, sous une pression absolue d'environ 3 ou 4 atmosphères, ce qui fait 45 à 60 livres anglaises par pouce carré, ou 3 à 4 kilogr. par centimètre carré; ou, pour employer l'expression en usage, la vapeur y est formée sous une pression *effective* (en sus de la pression atmosphérique) de 30 à 45 livres par pouce carré, ou de 2 à 3 kilogrammes par centimètre carré. Ensuite cette vapeur pénètre dans le cylindre au-dessus du piston, tandis que la face inférieure de celui-ci se trouve en communication libre avec l'atmosphère, au moyen des passages de sortie de ce côté, qui se trouvent alors ouverts. Le piston éprouve donc, sur sa face supérieure, la pression de la vapeur, et sur sa face opposée, la pression de l'atmosphère; et, comme la première de ces deux forces excède considérablement la seconde, il est poussé vers le bas du cylindre, et

opère sa course descendante. Dès qu'il est parvenu au bas du cylindre, il se fait un changement dans les passages de la vapeur. Le conduit par lequel la vapeur arrive de la chaudière, au lieu de continuer à communiquer avec le dessus du piston, se trouve maintenant dirigé vers le dessous; tandis que, dans le même instant, le passage par lequel la vapeur s'échappe dans l'atmosphère communique avec le sommet du cylindre ou la face supérieure du piston. La vapeur de la chaudière, prenant donc la nouvelle route qui lui est ouverte, se précipite dans le cylindre au-dessous du piston; en même temps la vapeur située au-dessus de ce piston, et qui avait servi à exécuter la course précédente, s'échappe dans l'atmosphère, de sorte qu'il ne reste plus de ce côté que la pression atmosphérique. Ainsi le piston, pressé au-dessous par la vapeur de la chaudière, remonte dans le cylindre, et parvient au sommet de sa course; puis un nouveau changement des passages s'opère, le piston reprend sa direction descendante, et ainsi de suite.

On voit de quelle manière s'exécutent les mouvemens ascendans et descendans du piston. En outre, la tige de celui-ci est liée par une bielle à une manivelle fixée sur l'arbre du volant. A chaque course du piston, la manivelle fait donc opérer au volant une demi-révolution. Dans les premiers instans, ce mouvement est extrêmement lent; mais comme les courses successives du piston, soit en montant, soit en descendant, tendent toujours à continuer la révolution du volant dans le même sens, ainsi que cela se voit dans le rouet et dans le tour ordinaires, il s'ensuit que la vitesse s'accélère graduellement, et qu'elle acquiert enfin un degré dépendant des circonstances dans lesquelles travaille la machine. Cette action du volant fait également comprendre comment, à la fin de chaque course du piston, le changement des passages de la vapeur peut être exécuté par la machine elle-même; car, puisque le volant, une fois mis en mouvement, continue de lui-même, pendant quelque temps, sa rotation, en vertu de son inertie, il dispose d'une force suffisante, non-seulement pour mouvoir les pièces destinées à changer les passages de la vapeur, mais encore pour continuer, sans ralentissement sensible, le mouvement de la machine pendant les interruptions momentanées qui ont lieu dans l'action de la vapeur.

La *pl. XII* représente une machine à haute pression d'un travail ordinaire de 20 chevaux. Comme nous avons déjà, dans le chap. III, décrit en détail les principaux élémens qui entrent dans sa composition, ainsi que dans celle des autres machines, nous serons en ce moment dispensés d'y revenir; et il nous suffira de montrer sur la figure l'emplacement et l'action réciproque des pièces de la machine que nous considérons, en renvoyant, pour plus de détails, aux explications et aux figures déjà données dans l'ouvrage.

La chaudière de la machine est placée dans une chambre voisine, et elle est de la forme *cylindrique à foyer intérieur*, déjà décrite *fig.* 18. La vapeur, en sortant de la chaudière, arrive par le tube A, et traverse d'abord la soupape à gorge qui est contenue dans la boite *a*. Ensuite, elle pénètre par le tuyau *a'* dans la

boite à vapeur B, qui présente ici la forme extérieure d'un pilastre séparé de la machine. Le tiroir est de la forme représentée dans la *fig*. 46, *pl. VI*, qui a déjà été expliquée en détail. Il consiste en un tuyau courbé en forme de fer à cheval, et dont les deux extrémités s'appuient, au moyen d'un ressort de pression, contre la face plane sur laquelle s'exécute son mouvement. Cette face plane présente trois ouvertures : une en haut, qui est le port supérieur du cylindre, et deux en bas, qui sont le port inférieur du cylindre et le port d'éduction. L'orifice supérieur du tiroir est de même grandeur que le port d'en haut du cylindre, mais son orifice inférieur est beaucoup plus large et peut couvrir à la fois le port inférieur du cylindre et le port d'éduction. Il en résulte que, quand le tiroir est au haut de sa course, comme il est représenté sur la *fig*. 46, le port supérieur du cylindre se trouve découvert et reçoit la vapeur venant de la chaudière, tandis que le port inférieur et le port d'éduction, se trouvant à la fois compris dans l'ouverture inférieure du tiroir, permettent à la vapeur qui occupait le bas du cylindre de s'échapper par le tuyau d'éduction. Dans ce moment le piston de la machine exécute donc sa course descendante; mais, si, au contraire, le tiroir est baissé d'environ 2 pouces et demi, ou s'il est au bas de sa course, l'orifice supérieur du tiroir tombe sur le port d'en haut du cylindre, et le tiroir forme alors un conduit qui mène la vapeur du haut du cylindre au tuyau d'éduction, tandis que le port inférieur du cylindre, n'étant plus recouvert par le tiroir, reçoit librement la vapeur qui remplit la boite à vapeur. Ainsi, à mesure que le tiroir monte ou descend, il laisse pénétrer la vapeur de la chaudière successivement au-dessus et au-dessous du piston, et laisse en même temps sortir la vapeur située sur la face opposée du piston et qui a terminé son action dans la machine.

La vapeur, en parcourant le tuyau d'éduction, est ordinairement employée à chauffer, autant que possible, l'eau destinée à l'alimentation de la chaudière. Dans la machine représentée sur la *pl. XII*, la vapeur est conduite dans un tube de 4 pouces anglais de diamètre et de 9 pieds de longueur, lequel est renfermé dans un autre tube de 8 pouces de diamètre, contenant l'eau qui doit passer dans la chaudière; et cette eau y acquiert d'abord une température d'environ 92 degrés du thermomètre de Fahrenheit, ou 33 degrés centigrades, avant de servir à l'alimentation. Enfin, après avoir parcouru ce tube, la vapeur est conduite dans la cheminée du foyer où elle s'échappe librement avec les gaz qui proviennent de la combustion.

La vapeur distribuée par le tiroir pénètre dans le cylindre à vapeur de la machine. Ce cylindre est contenu dans une enveloppe métallique, qui sert à le protéger contre tout refroidissement extérieur, et que l'on voit figurée en C. L'intervalle compris entre cette enveloppe et le cylindre est d'environ 2 pouces, et rempli d'air ou quelquefois de la vapeur même de la chaudière. Le piston contenu dans le cylindre à vapeur monte et descend successivement, selon que la vapeur est admise au-dessous ou au-dessus par le tiroir; mais pour que sa tige D suive une

direction parfaitement parallèle à l'axe du cylindre, elle est dirigée par une traverse *d*, dont les deux extrémités glissent à frottement doux le long de deux guides verticales d', d', qu'elles embrassent au moyen d'un étoupage d'', d''. A mesure que le piston monte ou descend, il communique le même mouvement aux deux bielles F, F; et celles-ci, en agissant sur les deux manivelles *f*, *f*, qui sont montées sur l'arbre *g*, *g*, impriment un mouvement de rotation au volant G. Enfin, au moyen d'une roue dentée, ou de tout autre mécanisme, le volant met définitivement en jeu l'appareil nécessaire au travail spécial de la machine.

La rotation de l'arbre du volant est, comme nous l'avons dit, employée à produire le jeu des tiroirs. Pour cela, un excentrique *h* est monté sur l'arbre *g*, et, à mesure que cet arbre tourne, l'excentrique, au moyen de sa tige h', pousse et tire alternativement le levier vertical *i*. Celui-ci met en mouvement l'axe horizontal *k*, et, par conséquent, les bras *l*, *l*, qui, par l'intermédiaire des tiges *m*, *m*, soulèvent le chariot du tiroir, c'est-à-dire, la traverse inférieure *n*, les deux bielles *o*, *o*, et enfin, la traverse supérieure n'. Cette dernière, enlevant avec elle la tige *p* du tiroir, soulève donc ou baissse celui-ci, selon qu'il convient au mouvement de la machine. Pour que le tiroir ne présente pas plus de résistance à l'excentrique, quand il doit être soulevé, que quand il doit être abaissé, il est équilibré autour de l'axe *k*, par un contre-poids suspendu sous le plancher de la machine, au bout du bras *q*, au moyen d'une tige q', dont l'extrémité joue dans une coulisse destinée à l'empêcher de prendre un mouvement d'oscillation.

Le gouverneur à force centrifuge est représenté en *r*. Son mouvement est réglé par celui de l'arbre du volant, au moyen de deux poulies, à plusieurs gorges r', r'', sur lesquelles s'enroule une corde sans fin. Quand l'arbre du volant prend un mouvement trop rapide, les deux boules du gouverneur s'écartent l'une de l'autre par l'effet de la force centrifuge. Alors, la douille r''', r''' du gouverneur est soulevée. D'autre part, ce mouvement se transmet, par le levier à fourche *s*, à l'axe horizontal s', et de celui-ci au levier s'', qui pousse la tringle *v*. Enfin, comme cette tringle aboutit à la tige v' de la soupape à gorge, celle-ci se ferme de plus en plus, jusqu'à ce que la vitesse soit réduite au degré convenable, ainsi que nous l'avons expliqué dans le chap. III.

La petite pompe que l'on voit représentée en *t* est la pompe alimentaire de la chaudière. Elle est mise en jeu par un bouton à manivelle t', fixé sur une roue d'engrenage de la machine et hors du centre de cette roue. Une barre t'', articulée sur le bouton t', vient mettre en jeu le chariot de la pompe, et, par conséquent, le *plongeur t*, qui refoule l'eau du corps de pompe dans la chaudière. Pour cela, cette barre t'' s'embraye au moyen d'une encoche, et à la manière d'une tige ordinaire d'excentrique, sur le levier t''', qui met en mouvement le chariot du plongeur; et comme cette encoche peut être embrayée en deux points différens du levier, elle peut au besoin faire exécuter à la pompe une course double de celle qui suffit pour entre-

tenir le niveau de la chaudière. On peut donc, par ce moyen, soit suspendre l'alimentation en désembrayant l'encoche, soit maintenir le niveau à-peu-près constant pendant le travail, soit enfin remplir très promptement la chaudière, comme cela devient nécessaire quand on l'a laissée trop longtemps sans alimentation. Le levier t''' agit sur l'axe horizontal u, et celui-ci soulève et baisse les bras u', u', qui font définitivement mouvoir le chariot de la pompe, au moyen des deux bielles u'', u'' et de la traverse supérieure u'''.

ARTICLE II.

THÉORIE DES MACHINES A HAUTE PRESSION ET DES MACHINES SANS DÉTENTE EN GÉNÉRAL.

§ I. *Des effets de la machine avec une charge ou une vitesse quelconques.*

L'action de la machine à haute pression étant bien comprise, nous allons maintenant passer au calcul de ses effets; et pour cela, nous en présenterons d'abord la théorie sous une forme assez générale pour embrasser en même temps toutes les machines rotatives ou à double action, sans détente.

Nous avons dit, en développant la théorie générale de l'action de la vapeur, dans le chapitre précédent, que les formules convenables au calcul des machines sans détente peuvent se déduire des formules générales, en y supposant la détente nulle, c'est-à-dire, en y fesant $l' = l$. En outre, comme, pour ces machines, la détente n'est susceptible d'aucune variation, puisqu'elle n'existe pas, le troisième cas considéré dans la théorie générale ne peut se présenter. Ainsi, il n'y a que deux cas à observer dans leur travail, savoir : celui où elles fonctionnent *avec une charge quelconque*, et celui où elles fonctionnent *avec leur charge maximum, ou de plus grand effet utile*.

Nous pourrions donc conclure immédiatement ici, des formules générales déjà développées, les formules particulières qui conviennent aux machines que nous avons à traiter. Cependant, comme dans le calcul général que nous avons exposé, il se présente plus de complication qu'il n'est nécessaire pour le cas des machines sans détente, et que même nous avons dû y faire quelque usage des calculs différentiel et intégral, dont la connaissance n'est pas familière au plus grand nombre des lecteurs, nous croyons utile de laisser de côté les formules générales déjà trouvées, et de rechercher d'une manière directe celles qui conviennent à l'action de la vapeur, considérée dans les machines sans détente seulement.

On sait qu'on ne calcule jamais les effets des machines qu'après qu'elles sont parvenues au mouvement uniforme, c'est-à-dire, quand leur vitesse est devenue constante, ou, puisqu'il est ici question de machines rotatives, quand le nombre des révolutions qu'elles produisent par minute se conserve le même, sans augmentation ni diminution, pendant tout le mouvement. Or, dans ce cas, il y a nécessairement équilibre entre la puissance et la résistance; car, si la puissance était plus grande que la résistance, la

vitesse irait en augmentant, et si, au contraire, elle était moindre que la résistance, la vitesse irait en diminuant. Il y a donc égalité entre ces deux forces, c'est-à-dire, entre la pression appliquée par la vapeur *sur le piston*, qui est la vraie force motrice du mouvement, et la résistance résultant de l'intensité de la charge, du frottement du mécanisme et de toutes les autres forces diverses qui s'opposent au mouvement de la machine. Par conséquent, si nous appelons P la pression de la vapeur par unité de surface dans la chaudière, P' la pression inconnue ou force motrice qu'exercera cette vapeur dans le cylindre, et R la résistance *totale* opposée au mouvement du piston, on aura pour première équation de relation

$$P' = R. \qquad (A)$$

En outre, si la machine est en bon état, il est évident qu'il y a égalité entre la dépense et la production de vapeur. Or, si nous exprimons par S le volume d'eau vaporisé par unité de temps, dans la chaudière, ce volume d'eau se changera d'abord, dans la chaudière, en vapeur à la pression P; puis il se changera, dans le cylindre, en vapeur à la pression P'. Mais nous avons vu, dans le chap. II, § VI, que, pendant ce changement de pression, la vapeur reste toujours au maximum de densité pour sa température. De plus, dans les vapeurs au maximum de densité pour leur température, le volume spécifique de la vapeur, c'est-à-dire le rapport du volume occupé par la vapeur au volume de l'eau qui l'a produite, peut être exprimé par l'équation très-simple

$$\mu = \frac{m}{n + \omega},$$

dans laquelle μ est le volume spécifique cherché, ω la pression absolue de la vapeur et m et n deux nombres constans, dont nous avons donné les valeurs. Le volume de vapeur à la pression P', transmis chaque minute au cylindre de la machine et correspondant au volume d'eau S, sera donc

$$\mu S = \frac{mS}{n + P'}.$$

D'un autre côté, si l'on exprime par v la vitesse du piston, et par a l'aire du cylindre, va sera le volume décrit par le piston, dans l'unité de temps. Mais il faut remarquer que la vapeur se répand dans le cylindre, non-seulement dans l'espace matériellement parcouru par le piston, mais encore dans ce qu'on appelle la *liberté* du cylindre, c'est-à-dire dans l'espace libre et les passages aboutissans au cylindre, où cette vapeur se perd à chaque coup de piston. En appelant l la course du piston, et c la liberté du cylindre exprimée par une portion équivalente de la longueur utile du cylindre, on voit que al sera le volume décrit par le piston à chaque course, mais que $a(l + c)$ sera le véritable volume de vapeur dépensé dans la même course. Le volume de vapeur dépensé est donc, au volume décrit par le piston, dans le rapport

$$\frac{l + c}{l}.$$

Or, nous avons vu que le volume décrit dans l'unité de temps par le piston est av; le volume de vapeur dépensé dans le même intervalle de temps sera donc

$$av\frac{l+c}{l};$$

et, ainsi, l'égalité entre la production et la dépense de vapeur donnera pour seconde relation générale

$$\frac{mS}{n+P'} = av\frac{l+c}{l}. \qquad \text{(B)}$$

Par conséquent, en éliminant P' entre les deux équations (A) et (B), on obtiendra

$$v = \frac{l}{l+c}\cdot\frac{S}{a}\cdot\frac{m}{n+R}.$$

De plus, si l'on exprime par r la résistance de la charge, par f le frottement de la machine, lorsqu'elle fonctionne sans charge, par δ l'accroissement que ce frottement éprouve par chaque unité de la résistance r imposée à la machine, enfin, par p la pression subsistant contre la face opposée du piston, et résultant de l'atmosphère pour les machines sans condensation, ou de la condensation imparfaite dans le cylindre pour les machines à condensation, ces quatre forces étant d'ailleurs rapportées à l'unité de surface du piston, il est clair qu'on aura, pour la résistance *totale* R, la valeur

$$R = r + \delta r + f + p;$$

ce qui donnera enfin, pour la vitesse v de la machine, avec une charge connue, en fonction de toutes les données du problème,

$$v = \frac{l}{l+c}\cdot\frac{S}{a}\cdot\frac{m}{n+(1+\delta)r+p+f}. \qquad (1)$$

On en tirera réciproquement, pour la valeur de la charge ar, en fonction de la vitesse,

$$ar = \frac{l}{l+c}\cdot\frac{mS}{(1+\delta)v} - \frac{a}{1+\delta}(n+p+f). \qquad (2)$$

De même, la vaporisation capable de produire la vitesse v, sous la charge ar, sera

$$S = \frac{l+c}{l}\cdot\frac{av}{m}\left[n+(1+\delta)r+p+f\right]. \qquad (3)$$

Enfin, connaissant, au moyen de ces équations, la charge et la vitesse de la machine, leur produit donnera, sans autre calcul, l'effet utile de la machine, savoir :

$$\text{E. u.} = arv; \qquad (4)$$

et par suite on aura, comme dans le § IV, art. II, du chapitre précédent, la force en chevaux, et les autres modes sous lesquels on peut représenter l'effet utile de la machine.

§ II. *Du maximum d'effet utile de la machine.*

Le calcul précédent se rapporte au cas général dans lequel la charge ou la vitesse sont données à priori et sans aucune condition particulière; mais, si l'on veut connaître quelle est la vitesse ou la charge qui conviennent à la production du maximum d'effet utile de la machine, il faut examiner la valeur de l'effet utile *arv*, qui est, d'après l'équation (2),

$$\text{E. u.} = \frac{l}{l+c} \cdot \frac{mS}{1+\delta} - \frac{av}{1+\delta} n + p + f).$$

Or, cette expression, ne contenant la vitesse que dans des termes négatifs, acquerra évidemment son maximum lorsque cette vitesse sera la plus petite possible; et, d'un autre côté, en se reportant à l'équation (B), on y reconnait que la vitesse sera un minimum, quand la pression P' aura au contraire sa plus grande valeur, c'est-à-dire sera égale à la pression P de la chaudière. La vitesse du maximum d'effet utile de la machine sera donc fournie par l'équation (B), en y fesant $P' = P$, c'est-à-dire que cette vitesse sera

$$v' = \frac{l}{l+c} \cdot \frac{S}{a} \cdot \frac{m}{n+P}. \qquad (5)$$

Par conséquent, en substituant cette valeur dans l'équation (2), on aura pour la charge du maximum d'effet utile,

$$ar' = \frac{a}{1+\delta}(P - p - f); \qquad (6)$$

et, en la substituant dans l'équation (3), on aura, pour la vaporisation de la machine, en fonction de la vitesse du maximum d'effet,

$$S = \frac{l+c}{l} \cdot \frac{n+P}{m} av'. \qquad (7)$$

Enfin, le produit $ar'v'$ donnera la mesure du maximum d'effet utile de la machine, et on pourra l'exprimer, comme précédemment, sous les diverses formes indiquées dans le § V de l'art. I du chap. IV. On aura donc, ainsi, toutes les formules nécessaires à la solution des différens problèmes qui peuvent se présenter dans le calcul de ces machines.

Il faut cependant observer que les formules que nous venons d'obtenir donneront les effets utiles maxima que la machine est capable de produire, *avec la vaporisation* S; mais, comme il est évident, à la seule inspection de la formule, que la vitesse v', et, par conséquent, l'effet utile, sera d'autant plus grand que la vaporisation S sera considérable, il doit être entendu que les effets de la machine n'atteindront réellement leur limite maximum qu'autant que la vaporisation dans la chaudière sera la plus grande qui puisse s'y produire; c'est-à-dire que ce n'est qu'en donnant dans les formules, à la quantité S, sa plus grande valeur, que ces formules feront connaître les effets extrêmes qu'on peut attendre de la machine.

ARTICLE III.

FORMULES PRATIQUES POUR LE CALCUL DES MACHINES A HAUTE PRESSION, ET EXEMPLE DE LEUR APPLICATION.

Dans les machines à haute pression, la vapeur est produite dans la chaudière à une pression très-élevée. Elle passe ensuite dans le cylindre, où elle agit successivement au-dessus et au-dessous du piston, pour lui imprimer un mouvement alternatif, et ensuite elle s'échappe librement dans l'atmosphère, sans être condensée. Par conséquent, au lieu d'avoir, sur la face opposée à l'action de la vapeur, un vide plus ou moins parfait résultant de la condensation, c'est-à-dire une pression nulle ou presque nulle, il y subsiste toujours, au contraire, la pression atmosphérique, laquelle succède aussitôt à la pression qu'exerçait auparavant la vapeur. Dans ces machines, la pression de l'atmosphère doit donc être comptée parmi les forces qui s'opposent au mouvement du piston; c'est-à-dire que la quantité représentée par p doit avoir ici une valeur égale à 14.71 livres par pouce carré, en mesures anglaises, et 1.033 kilogramme par centimètre carré, en mesures françaises.

Pour être en état d'appliquer les formules que nous venons de développer, il faut encore connaître les deux quantités f et δ; c'est-à-dire le frottement de la machine fonctionnant sans charge, et son frottement additionnel par unité de la charge r. A cet égard, des expériences spéciales et circonstanciées seraient nécessaires.

Nous avons bien cité, dans le § V du chap. I de cet ouvrage, une expérience faite sur une machine à haute pression servant aux épuisemens, qui a donné, pour le frottement de la machine non chargée, 3.5 livres par pouce carré de la surface du piston; mais, comme ce résultat comprenait, outre le frottement *propre* de la machine, celui d'un second arbre d'engrenage et des roues dentées qui servaient à transmettre le mouvement aux pompes d'épuisement, il est évident qu'il était beaucoup trop fort pour être appliqué à la machine seule. A défaut d'expériences spéciales pour les machines à haute pression, nous recourrons donc aux données expérimentales

fournies par les machines de Watt, et dont nous parlerons plus loin. D'après ces données, nous verrons qu'on peut évaluer le frottement de ces machines, y compris le travail de leurs pompes de service, c'est-à-dire des pompes d'air, d'eau froide et d'eau chaude ou d'alimentation, à 0.75 livre par pouce carré de la surface du piston, pour les machines à cylindre de 33 pouces ou 2.75 pieds de diamètre; et que, dans les machines à cylindre différent, ce frottement varie à-peu-près en raison inverse du diamètre du cylindre. Nous admettrons donc ici cette évaluation, en observant toutefois qu'elle doit se trouver un peu trop forte pour les machines à haute pression qui n'ont point de pompe d'air ni d'eau froide.

Ainsi, en rapportant cette mesure au pied carré et représentant d'ailleurs par d le diamètre du cylindre exprimé en pieds, nous aurons

$$f = 0.75 \times 144 \frac{2.75}{d} = \frac{300}{d}.$$

On remarquera que, pour une machine à cylindre de 16 pouces de diamètre, cette évaluation donne $f = 1.5$ livre par pouce carré de la surface du piston, et que cette valeur est précisément celle que l'expérience a fait connaître pour le frottement des machines locomotives de dimensions pareilles, comme on le verra plus loin. Cette observation tend donc encore à confirmer l'évaluation précédente.

Quant à la quantité δ, ou au frottement additionnel créé dans la machine par unité de la charge r, jusqu'à ce que nous ayons pu acquérir des notions précises à ce sujet, nous adopterons la valeur fournie par l'expérience dans les machines locomotives, qui sont aussi des machines à haute pression sans détente. Dans celles-ci, nous verrons que le frottement additionnel, créé dans la machine par une résistance quelconque, est 0.14 de cette résistance. Nous prendrons donc encore ici

$$\delta = 0.14.$$

En outre, dans les machines à haute pression, ainsi que dans toutes celles qui sont rotatives, où le mouvement du piston est arrêté et réglé par une manivelle, l'intervalle laissé entre la fin de la course du piston et le fond du cylindre s'élève, y compris les passages aboutissans à $\frac{1}{20}$ de la longueur de la course; nous aurons donc en général, pour la liberté du cylindre,

$$c = 0.05\, l.$$

Enfin, en se reportant à ce que nous avons dit § III, art. II, chap. IV, on verra que, dans les machines à vapeur stationnaires, en raison de l'eau entraînée à l'état liquide et mélangée avec la vapeur, la vaporisation *effective* ou la valeur de S, à introduire dans les formules, peut être portée à 0.95 de la vaporisation brute observée dans la chaudière.

En introduisant donc ces valeurs dans les formules, hors celles de f, δ et S, qui ne sont qu'approximatives, et en y mettant en outre, pour les constantes m et n, les valeurs qui conviennent aux machines sans condensation, savoir, en mesures

anglaises et quand la pression est exprimée en livres par pied carré,

$$m = 4{,}348{,}000,$$
$$n = 620,$$

on obtient les formules numériques suivantes, pour le calcul des machines dont nous nous occupons.

Formules pratiques pour les machines à haute pression (mesures anglaises).

CAS GÉNÉRAL.

$v = \frac{S}{a} \cdot \frac{4{,}140{,}950}{2738 + (1+\delta) r + f}$. . . . . . Vitesse du piston, en pieds, par minute.

$ar = 4{,}140{,}950 \frac{S}{(1+\delta)v} - \frac{a}{1+\delta}(2738 + f)$. Charge utile du piston, en livres.

$S = av \frac{2738 + (1+\delta) r + f}{4{,}140{,}950}$. . . . . . . Vaporisation effective, en pieds cubes, d'eau par minute.

$E. u. = arv$. . . . . Effet utile, en livres élevées à 1 pied par minute.

$E. u. ch. = \frac{arv}{33000}$. . . . . Effet utile, en chevaux.

$E. u. 1 lb. co. = \frac{avr}{N}$. . . . . Effet utile de 1 lb. de combustible, en livres élevées à 1 pied.

$E. u. 1 p. e. = \frac{arv}{S}$. . . . . Effet utile de 1 pied cube d'eau, en livres élevées à 1 pied.

$Q. co. pr. 1 ch. = \frac{33000 N}{arv}$. . . . . Quantité de combustible, en livres, qui produit l'effet d'un cheval.

$Q. e. pr. 1 ch. = \frac{33000 S}{arv}$. . . . . Quantité d'eau, en pieds cubes, qui produit l'effet d'un cheval.

$E.u. ch. pr. 1 lb. co. = \frac{arv}{33000 N}$. . . . . Effet, en chevaux, produit par livre de combustible.

$E. u. ch. p. 1 p. e. = \frac{arv}{33000 S}$. . . . . Effet, en chevaux, produit par pied cube d'eau vaporisée.

CAS DU MAXIMUM D'EFFET UTILE.

$v' = \frac{S}{a} \cdot \frac{4{,}140{,}950}{620 + P}$. . . . . Vitesse du piston, en pieds, par minute.

$ar' = \frac{a}{1+\delta}(P - f - 2118)$. . . . . . . Charge utile du piston, en livres.

$S = av' \frac{620 + P}{4{,}140{,}950}$. . . . . Vaporisation effective, en pieds cubes, d'eau par minute.

$E. u. max. = ar'v'$. . . . . Effet utile, en livres élevées à 1 pied par minute.

Nous n'ajouterons pas, aux formules du cas de maximum d'effet utile, les diverses expressions de cet effet utile, en chevaux, en poids de combustible, etc., parce que les formules qui les donnent sont les mêmes que celles du cas général.

Pour montrer une application de ces formules, supposons qu'il s'agisse de déterminer les effets que l'on peut attendre d'une machine de ce système déjà construite, et dont les dimensions et autres données soient connues, savoir :

Cylindre, 16 pouces de diamètre; ou $a = 1.3963$ pied carré.
Course du piston, 3 pieds; ou $l = 3$ pieds.
Vaporisation effective, 0.378 pied cube par minute; ou $S = 0.378$ pied cube.
Consommation de combustible dans le même temps, 3.189 livres de houille; ou $N = 3.189$ lb.
Pression *absolue* dans la chaudière, 54.50 lbs par pouce carré; ou $P = 7848$ lbs par pied carré.

En faisant le calcul avec ces données, on obtient les résultats suivans, pour les effets que produira cette machine, avec la vaporisation ci-dessus, en marchant à sa vitesse de maximum d'effet utile et aux vitesses respectives de 170 et 250 pieds par minute :

			Maximum d'effet utile.
v . . . . =	250	... 170	... 132
ar . . . . =	1876	... 4460	... 6754
$\frac{r}{144}$ . . . . =	9.33	... 22.18	... 33.59
S. . . . . =	0.378	... 0.378	... 0.378
E. u. . . . . =	469,000	... 758,200	... 894280
E. u. ch. . . . . . =	14.21	... 22.98	... 27.10
E. u. 1 lb. co. . . . =	147.070	... 237,760	... 280,430
E. u. 1 p. e. . . . . =	1,240,740	... 2,005,800	... 2,365,800
Q. co. pr. 1 ch. . . =	0.224	... 0.139	... 0.118
Q. e. pr. 1 ch. . . . =	0.027	... 0.016	... 0.014
E. u. ch. pr. 1 lb. co. =	4.46	... 7.21	... 8.50
E. u. ch. pr. 1 p. e. =	37.60	... 60.78	... 71.69

Ces effets seront ceux de la machine, si l'on maintient le feu assez activement dans la chaudière pour produire une vaporisation effective de 0.378 pied cube par minute. Mais s'il arrive qu'on veuille mettre en mouvement une moindre charge, sans cependant augmenter la vitesse du travail, il est évident qu'on pourra se contenter d'une moindre vaporisation dans la chaudière, ou pousser le feu moins activement. Supposons donc que, dans un cas semblable, la vaporisation ait été réduite à 0.292 pied cube d'eau par minute, la consommation correspondante de combustible se trouvant en même temps de 2.221 lbs de houille par minute, et la pression absolue dans la chaudière de 55.13 lbs par pouce carré, alors les effets produits par la machine, à la vitesse du maximum d'effet utile, et aux vitesses respectives de 170 et 250 pieds par minute, deviendront :

			Maximum d'effet utile.
v	= 250	... 170	... 101
ar	= 627	... 2625	... 6865
$\frac{r}{144}$	= 3.12	... 13.05	... 34.15
S.	= 0.292	... 0.292	... 0.292
E. u.	= 156,750	... 445,910	... 694,740
E. u. ch.	= 4.75	... 13.51	... 21.05
E. u. 1 lb. co. . . .	= 70,582	... 200,780	... 312,830

Tels seront donc les effets produits par la machine. Ainsi l'on voit que, selon la vitesse du mouvement et la vaporisation de la chaudière, il pourra arriver que la charge que peut supporter le piston se réduise de 34 livres à 3 livres environ par pouce carré; tandis que, si l'on voulait calculer cette machine par le procédé ordinaire, c'est-à-dire en appliquant à la pression de la vapeur dans la chaudière, un coefficient constant, le coefficient 0.60 par exemple, pour en déduire la charge utile de la machine, cette charge, dans tous les cas indistinctement, même aux plus grandes vitesses, et avec une vaporisation presque nulle, serait toujours de

$$(54.50 - 14.71) \times 0.60 = 23.88 \text{ livres par pouce carré.}$$

Et, de plus, l'effet utile, ou la force en chevaux, étant le produit de l'effort par la vitesse, serait d'autant plus grand que la vitesse du mouvement serait plus considérable.

La machine à haute pression que nous venons de calculer est celle de la distribution publique des eaux de la ville de Brighton, en Angleterre, et les effets qu'elle produit sont une pleine confirmation des résultats que nous venons d'obtenir. En effet, cette machine a un cylindre de 16 pouces de diamètre et une course du piston de 3 pieds, et, mise en expérience par nous avec tout le soin dont nous étions capable, elle a produit les résultats suivans.

Le 19 novembre 1841, la machine, manœuvrant 6 pompes d'épuisement, qui forment sa charge complète, a travaillé pendant 6h 0m. La vaporisation dans la chaudière, soigneusement mesurée dans le réservoir d'alimentation, a été de 143.285 pieds cubes d'eau, en tout, ce qui fait 0.398 pied cube par minute; mais retranchant les 0.05 de ce nombre pour tenir compte de l'eau enlevée à l'état liquide avec la vapeur, la vaporisation effective a été de 0.378 pied cube par minute. La consommation de houille, pesée à mesure du besoin, a été de 1148 livres ou 3.189 livres par minute. Dans ces conditions la machine a pris une vitesse régulière de 56.11 courses du piston, ou 168.33 pieds par minute; et la charge *totale* de la machine, mesurée par expérience, comme nous l'avons expliqué chap. IV, art. III, § III, en essayant la moindre pression avec laquelle on pouvait maintenir la machine en mouvement, s'est trouvée être de 29.05 livres par pouce carré de la surface du piston.

Or, ces résultats sont parfaitement d'accord avec ceux qui sont donnés par le calcul précédent ; car on voit qu'avec cette vaporisation, la charge effective dont était capable la machine, à la vitesse de 170 pieds par minute, était de 22.18 livres par pouce carré ; et, en ajoutant à ce nombre 1.50 livre pour le frottement *propre* de la machine, et $22.18 \times 0.14 = 3.11$ livres, pour le frottement additionnel dû à la charge de 22.18 livres, on trouve définitivement pour la charge totale de la machine 26.79 livres par pouce carré, qui ne diffère que de 2 livres environ du nombre résultant de l'expérience. Et même, si l'on veut être plus précis, et chercher le résultat de la formule, non pas pour la vitesse de 170 pieds par minute, mais pour celle de 168.33 pieds, qui était la vitesse réelle, on trouve que la charge totale de la machine devait être alors de 27.22 livres par pouce carré; et ce nombre ne diffère que de 1.83 lb du nombre donné par l'observation.

La seconde expérience, que nous avons faite sur la même machine, offre une nouvelle confirmation des formules présentées. Cette expérience a donné les résultats suivans.

Le 23 novembre 1841, la même machine, mise en expérience avec trois pompes d'épuisement seulement, a travaillé pendant $4^h 50^m$. La vaporisation mesurée dans le réservoir d'alimentation a été de 89.052 pieds cubes d'eau, ce qui fait 0.307 pied cube par minute pour la vaporisation brute, et 0.292 pied cube pour la vaporisation effective; la consommation de houille a été de 644 lbs, ou 2.221 lbs par minute. Dans ces conditions, la machine a pris une vitesse régulière de 57.30 courses du piston, ou 171.9 pieds par minute ; et la charge *totale* de la machine, mesurée directement, s'est trouvée être de 15.50 livres par pouce carré de la surface du piston.

Or, on trouvera que les nombres de la seconde série des résultats présentés plus haut s'accordent avec cette expérience, et si l'on cherche plus particulièrement la charge que devait être en état de mouvoir la machine à la vitesse de 171.9 pieds par minute, on trouvera que cette charge était de 12.70 livres par pource carré ; et en y ajoutant pour le frottement propre de la machine 1.50 lb, et, pour le frottement additionnel, $12.70 \times 0.14 = 1.78$, on trouve 15.90 lbs par pouce carré, qui ne diffère que de 0.48 de la charge *totale* 15.50 obtenue par l'expérience. Il y a donc, autant que possible, coincidence entre les résultats du calcul et ceux de l'observation.

A l'égard de la charge *totale* de la machine, savoir : 29.05 ou 15.50 livres par pouce carré du piston, dans les deux cas ci-dessus, nous devons ajouter, pour ceux qui ne connaissent pas la distribution d'eau de Brighton, que cette charge était produite : 1°. par le poids de l'eau pompée, qui, d'après la hauteur du réservoir et le niveau du puits, les jours mentionnés, formait une colonne de 140.07 pieds de hauteur sur une base de 2.2294 pieds carrés pour les six pompes, et 1.0472 pied carré pour les trois pompes de 8 pouces, mise en mouvement au quart de la vitesse du piston à vapeur; 2°. par la force nécessaire pour transporter cette eau à la distance horizontale de 4650 pieds dans un tuyau de 1 pied de diamètre; 3°. par le frotte-

ment *propre* de la machine ; et 4°. enfin, par le frottement des arbres d'engrenage, des roues dentées et des pompes d'épuisement.

Pour avoir les mêmes formules numériques, en mesures françaises, il suffit d'observer qu'alors on aura pour les constantes :

Pression atmosphérique, $p = 10330$ kilogrammes par mètre carré.

Frottement de la machine sans charge, exprimé en kilogrammes par mètre carré, pour un cylindre dont le diamètre d est exprimé en mètres, $f = \frac{450}{d}$.

Frottement additionnel de la machine par unité de la charge, $\delta = 0.14$.

Rapport de la dépense de vapeur au volume décrit par le piston, $\frac{l+c}{l} = 1.05$.

Constantes du volume spécifique de la vapeur,

$$m = 21{,}232{,}000,$$
$$n = 3020.$$

Par conséquent, en effectuant, au moyen de ces valeurs, toutes les opérations possibles dans les équations, on trouvera pour les formules numériques propres au calcul des machines dont nous nous occupons, et en mesures françaises :

Formules pratiques pour les machines à haute pression
(mesures françaises) :

CAS GÉNÉRAL.

$v = \frac{S}{a} \cdot \frac{20{,}220{,}950}{13333 + (1+\delta) r + f}$ . . . . . . Vitesse du piston, en mètres par minute.

$ar = 20{,}220{,}950 \frac{S}{(1+\delta) v} - \frac{a}{1+\delta} (13333 + f)$. Charge utile du piston, en kilogrammes.

$S = av \frac{13333 + (1+\delta) r + f}{20{,}220{,}950}$ . . . . . . Vaporisation effective, en mètres cubes d'eau, par minute.

$\text{E.u.} = arv$. . . . . Effet utile, en kilogrammes élevés à 1 mètre par minute.

$\text{E.u.ch.} = \frac{\text{E.u.}}{4500}$ . . . . Effet utile, en chevaux.

$\text{E.u. 1 k.co.} = \frac{\text{E.u.}}{N}$ . . . . Effet utile de 1 kilogramme de combustible, en kil^{s}. élevés à 1 mètre.

$\text{E.u. 1 m.e.} = \frac{\text{E.u.}}{S}$ . . . . Effet utile de 1 mètre cube d'eau, en kilogr. élevés à un mètre.

$\text{Q.co.pr. 1 ch.} = \frac{4500\,N}{\text{E.u.}}$ . . . . Quantité de combustible, en kilog^{s}., qui produit l'effet d'un cheval.

$\text{Q.e.pr. 1 ch.} = \frac{4500\,S}{\text{E.u.}}$ . . . . Quantité d'eau, en mètres cubes, qui produit l'effet d'un cheval.

$\text{E. u. ch. pr. 1 k. co.} = \frac{\text{E. u.}}{4500\,N}$ . . . . Effet utile, en chevaux, produit par kilogramme de combustible.

$\text{E. u. ch. pr. 1 m. e.} = \frac{\text{E. u.}}{4500\,S}$ . . . . Effet utile, en chevaux, produit par mètre d'eau vaporisée.

CAS DU MAXIMUM D'EFFET UTILE.

$v' = \frac{S}{a} \cdot \frac{20{,}220{,}950}{3020 + P}$ . . . . Vitesse du piston, en mètres, par minute.

$ar' = \frac{a}{1 + \delta}\,(P - f - 10333)$ . . . . Charge utile du piston, en kilogrammes.

$S = av' \frac{3020 + P}{20{,}220{,}950}$ . . . . Vaporisation effective, en mètres cubes d'eau, par minute.

$\text{E. u. max.} = ar'v'$ . . . . Effet utile, en kilogrammes élevés à 1 mètre par minute.

Enfin, si l'on veut faire l'application de ces formules aux effets de la même machine, dont les dimensions ont été données plus haut en mesures anglaises, il suffit de rapporter toutes les mesures aux unités françaises ; ce qui donne d'abord :

Diamètre du cylindre, 40.64 centimètres; ou $a = 0.12972$ mètre carré.
Course du piston, 0.914 mètre; ou $l = 0.914$.
Vaporisation effective, 0.010702 mètre cube par minute; ou $S = 0.010702$.
Consommation de combustible dans le même temps, 1.4459 kilogramme; ou $N = 1.4459$.
Pression absolue dans la chaudière, 3.8301 kilogrammes par centimètre carré; ou $P = 38301$ kilogrammes par mètre carré.

En fesant le calcul avec ces élémens, on obtient les résultats suivans, pour les effets que produira cette machine, avec la vaporisation ci-dessus, en marchant à sa vitesse de maximum d'effet utile, et aux vitesses respectives de 76.20 et 51.80 mètres par minute.

			Maximum d'effet utile.
v	= 76.20	51.80	40.57
ar	= 852	2026	3063
$\frac{r}{10{,}000}$	= 0.657	1.562	2.361
S	= 0.01070	0.01070	0.01070
E. u.	= 64,922	104,950	123,660
E. u. ch.	= 14.23	23.02	27.12
E. u. 1 k. co.	= 44,900	72,580	85,523
E. u. 1 m. e.	= 6,066,400	9,806,400	11,555,000
Q. co. pr. 1 ch.	= 0.10156	0.06282	0.05330
Q. e. pr. 1 ch.	= 0.00075	0.00047	0.00039
E. u. ch. pr. 1 k. co.	= 9.85	15.92	18.76
E. u. ch. pr. 1 m. e.	= 1330	2151	2534

CHAPITRE VI.

MACHINES LOCOMOTIVES.

ARTICLE I.

DESCRIPTION DE LA MACHINE.

Les machines locomotives, en usage sur les chemins de fer, sont des machines à *haute pression*, *sans détente et sans condensation*, construites sur les mêmes principes que les précédentes, pour l'application de la vapeur comme force motrice; mais seulement elles sont mobiles sur des roues, et il y a deux cylindres au lieu d'un. La vapeur est de même formée à une pression très-élevée dans la chaudière; elle passe ensuite dans les cylindres, où elle est admise sans interruption pendant toute la durée de la course du piston, et enfin elle s'échappe dans l'atmosphère, sans avoir été condensée.

La vapeur une fois parvenue dans le cylindre y agit successivement d'un côté et de l'autre du piston, et lui communique ainsi un mouvement rectiligne alternatif qui, par l'intermédiaire d'une manivelle, se change en un mouvement de rotation appliqué aux roues qui soutiennent la machine; et l'effet de cette rotation est de porter en avant la machine elle-même, suivie de tout son train.

La *pl. XIII* représente une machine locomotive sortie des ateliers du célèbre constructeur anglais M. Robert Stephenson. Les parties principales de la machine sont: le foyer et la chaudière, qui constituent les moyens de former la vapeur; les tiroirs et les cylindres, qui servent à mettre cette vapeur en action; et enfin, les manivelles et les roues, par le moyen desquelles le mouvement des pistons produit la progression de la machine elle-même. Nous décrirons successivement ces diverses parties, puis nous passerons à quelques autres moins importantes.

En jetant un coup d'œil sur la *fig.* 75, on y voit le corps de la machine, composé de trois compartimens distincts. Celui d'arrière, A, qui a la forme d'un carré surmonté d'un dôme arrondi, se nomme la boîte à foyer. Il fait partie de la chaudière et contient de l'eau; mais, dans cette eau, est placé le foyer, c'est-à-dire une boîte intérieure A', dans laquelle est le feu destiné à produire la vaporisation.

Le compartiment du milieu, CC, est cylindrique; il forme la chaudière proprement dite et contient aussi de l'eau qui communique avec celle que renferme la boîte à foyer. Enfin, le compartiment d'avant de la machine, B, est ce qu'on nomme la boîte à fumée; il est surmonté de la cheminée et contient les tiroirs et les cylindres. Sa forme est analogue à celle de la boîte à foyer. En dessous du corps de chaudière sont les pièces qui servent à utiliser l'action de la vapeur pour la progression de la machine.

Ainsi qu'on vient de le dire, le foyer A' est placé dans l'intérieur du premier compartiment de la chaudière, et il est environné d'eau, qui remplit le double fond *aa*, ou l'intervalle des deux boîtes. Au fond est la grille *a'*, sur laquelle est placé le coke, et qui laisse passer l'air nécessaire à la combustion. Cette grille est composée de barres séparées qu'on peut, au moyen d'un crochet, faire tomber dessus leurs supports, ce qui permet d'éteindre le feu instantanément. La flamme, après avoir frappé le sommet de la boîte à feu, se divise dans tous les petits tubes *a''*, *a''*, qui lui font traverser le deuxième compartiment de la chaudière et la conduisent définitivement à la boîte à fumée, d'où elle s'échappe dans la cheminée B'. La porte du foyer est en *a'''*, et A'' représente la plaque de support sur laquelle se tient le machiniste. Immédiatement derrière la machine suit son fourgon d'approvisionnement, qui porte l'eau nécessaire à l'alimentation de la chaudière, et le coke requis pour les besoins du foyer; ce fourgon est attaché à la machine par une tige de jonction qui se prête aux oscillations du mouvement. Enfin, pour que la chaudière soit protégée contre tout refroidissement extérieur, elle est recouverte d'une seconde enveloppe formée de douelles de bois appliquées par-dessus le métal, mais laissant un petit intervalle entre elles et le métal.

L'eau de la chaudière prend son niveau dans les deux compartimens qu'elle occupe, et ce niveau ne doit jamais laisser à découvert, ni le sommet de la boîte à feu, ni les petits tubes qui sont parcourus par la flamme. A cet effet, il y a, sur le côté de la chaudière, trois petits robinets-jauge, comme ceux dont nous avons parlé § II, chap. III, et, en outre, un niveau à tube de verre semblable à celui de la *fig.* 4, *pl. I.* Ces petits appareils ne sont pas vus sur la *fig.* 75.

La vapeur, en se dégageant du liquide, remplit le dôme à vapeur AA, où elle s'amasse à mesure de sa formation; mais elle ne peut y acquérir une force élastique trop considérable, parce qu'il y a, sur la chaudière, deux soupapes de sûreté, qui lui donnent issue dans l'atmosphère, dès que sa pression dépasse une limite fixée. La première de ces deux soupapes, *d*, est à levier et balance, comme celle qui a été représentée dans les *fig.* 2 et 3, *pl. I*; l'autre est souvent formée de plusieurs ressorts en lames, arc-boutés les uns contre les autres et contenus dans une boîte fermée, pour que le machiniste ne puisse y avoir accès et la surcharger. Sur le dôme A, ou sur le bord de la soupape *d*, est un sifflet d'avertissement *d'*, qui sert à annoncer l'approche de la machine; il consiste en un petit robinet

qui laisse sortir la vapeur contre le tranchant d'une espèce de gobelet renversé, où elle produit un sifflement qu'on entend de fort loin.

Dans le dôme à vapeur A est placé le tuyau S, où se fait la prise de vapeur, et qu'on élève à dessein, pour éviter que l'eau de la chaudière n'y soit jetée pendant les oscillations de la machine. La vapeur pénètre donc d'abord dans le tuyau S, et de là dans le tube S'; puis, dès qu'en tournant la poignée *r* on ouvre le régulateur *r'* qui intercepte le passage, elle se précipite dans le tube à vapeur S'', qu'elle suit dans toute sa longueur. Le régulateur *r'* est semblable à celui que nous avons décrit dans le § III du chap. III, c'est-à-dire qu'il consiste en deux disques concentriques appliqués l'un sur l'autre et percés chacun d'une ouverture angulaire. Lorsqu'en tournant la poignée *r'* on fait coïncider les deux ouvertures, la vapeur traverse librement le passage; mais si la partie pleine du disque mobile recouvre, au contraire, l'ouverture du disque fixe, le passage se trouve intercepté. La vapeur, après avoir traversé le régulateur, suit le tube S'', puis le tube S'''; celui-ci la conduit à la boite à vapeur *ss* (*fig.* 75 et 76), qu'elle remplit entièrement.

Ici la vapeur est distribuée en avant et en arrière de chaque piston, au moyen d'un tiroir *f*, semblable à celui que nous avons décrit (*fig.* 32 et 33, *pl. V*), et dont la tige est mise en mouvement par un excentrique fixé sur l'essieu coudé de la machine, comme nous le dirons un peu plus loin. Sur la figure, la direction des flèches indique la circulation de la vapeur; dans la position où est représenté le tiroir du cylindre de gauche de la machine, la vapeur pénètre en avant du piston par le port à vapeur 1 (*fig.* 75 et 76), et le fait, par conséquent, reculer dans le cylindre. Dans l'instant suivant, le tiroir changera de place, conduira la vapeur de la chaudière en arrière du piston, et, par conséquent, poussera celui-ci en avant, et ainsi de suite alternativement. Le jeu du tiroir, à mesure qu'il produit l'arrivée de la vapeur de la chaudière sur une face du piston, permet aussi, sur la face opposée, l'échappement de la vapeur qui a servi à opérer la course précédente; c'est ce qu'on reconnait sur la figure. La vapeur contenue derrière le piston sort par le port de derrière 2, arrive sous le tiroir et s'échappe par le passage *e*, dont on voit l'entrée figurée sous le tiroir, et qui la conduit au tube d'éduction E.

C'est d'ailleurs une particularité de la machine locomotive que ce tube d'éduction ne conduit pas la vapeur au dehors même de la machine, mais seulement dans la cheminée, où il se termine par un orifice rétréci qu'on nomme la *tuyère*, et dont l'action est semblable à celle d'un soufflet pour attiser le feu. En effet, la vapeur, en s'élançant en jets par l'orifice de la tuyère, produit derrière elle un vide qui se communique à l'instant au foyer, par les petits tubes *a'' a''*; et, par conséquent, une masse d'air se précipite aussitôt de dessous la grille au travers du combustible, pour remplir l'espace où le vide avait été fait. C'est à cet ingénieux moyen, combiné avec l'emploi de la chaudière multitubulaire, qu'on doit l'énorme production de vapeur qui rend les locomotives capables d'atteindre de si grandes vitesses; et nous

citerons avec plaisir que la chaudière à tubes a été inventée par M. Seguin d'Annonay, dont le brevet est du 22 février 1828, et que la première application de la vapeur perdue au tirage du feu a été faite à Paris, en 1826, par M. Pelletan, dans des expériences publiques sur un bateau à vapeur, en présence du préfet de la Seine; de sorte que ces deux inventions sont dues à des Français.

Il y a deux cylindres à vapeur G, G, qui sont placés horizontalement, et l'un à côté de l'autre, dans la boite à fumée, où ils sont protégés contre les effets condensateurs de l'air froid, par le passage de la flamme et les parois de la boite elle-même. Le piston de chacun de ces deux cylindres agit sur une manivelle fixée sur l'essieu des deux roues motrices de la machine, et tend à lui imprimer un mouvement de rotation; mais comme il y a, dans le jeu d'une manivelle, deux points où la force motrice est sans effet pour continuer le mouvement, ce qui a lieu quand le rayon de la manivelle se trouve dans la direction du mouvement alternatif, on place à angle droit, l'une sur l'autre, les deux manivelles correspondantes aux deux pistons. Par ce moyen, l'une est toujours dans son maximum d'action quand l'autre est sans effet, et le mouvement se continue sans variation sensible.

Cette position relative des deux manivelles de l'essieu, à angle droit l'une sur l'autre, se reconnait dans la *fig*, 76; car on y voit que, tandis que la manivelle de gauche est en *k*, dans la direction verticale, où elle reçoit tout l'effort du piston H par l'intermediaire de la tige *h* et de la bielle *h'*, l'autre manivelle se trouve en *k'*, c'est-à-dire dans la direction même du piston, qui devrait lui communiquer un mouvement de rotation. On voit en même temps, d'après la situation de la manivelle *g'*, que le second piston se trouve au fond de son cylindre, ou au bout de sa course, dans l'instant que le piston H est au milieu de la sienne; et cette alternation des deux pistons et des deux manivelles se continue pendant tout le mouvement. Sur la *fig*. 75, on ne voit que la tige *h* et la bielle *h'* du piston du cylindre de gauche, ainsi que le tiroir du même cylindre, parce que la coupe longitudinale que cette figure représente est faite le long du milieu de la machine. Pour assurer le mouvement des pistons dans la direction précise de l'axe des cylindres, la tige de chaque piston est munie d'une petite traverse ou navette qui glisse à frottement doux dans une coulisse formée de deux guides parallèles *h''*, *h''*.

L'essieu coudé K de la machine étant donc mis en mouvement, comme on vient de le dire, les deux roues, qui ne font qu'un avec lui, tournent en même temps, et, par conséquent, la machine exécute sa progression de la même manière qu'une voiture qu'on ferait avancer en poussant aux rais. La machine est portée sur six roues, et quelquefois sur quatre; mais de ces roues, il n'y a ordinairement que les roues *motrices* qui soient mises en action par les pistons, de sorte que les autres ne servent qu'à soutenir le poids de la machine. Cependant, comme le seul point d'appui des roues motrices pour pousser la machine en avant se trouve dans leur *adhérence* sur les rails, adhérence qui dépend du poids qu'elles supportent, et qui fait

que ces roues avancent au lieu de glisser, il pourrait arriver, pour les machines qui doivent tirer des charges considérables, que l'adhérence de deux roues fut insuffisante. Alors, on lie ensemble les trois roues de chaque côté de la machine, ou seulement deux d'entre elles, de manière que les roues motrices ne puissent tourner sans les entraîner également. Par ce moyen, la machine adhère par toutes ses roues et, par conséquent, elle devient capable de tirer des charges beaucoup plus fortes. Quand les roues de la machine sont égales, cette liaison s'établit par des bielles métalliques *k*, *l* (*fig.* 76) placées en-dehors et attachées aux roues par des boutons à manivelle, comme on le voit sur la figure; mais, quand les roues de la machine sont inégales, on peut encore rendre leur mouvement solidaire l'un de l'autre, au moyen d'un galet qu'on fait descendre entre les roues voisines par un levier de pression, et qui, en frottant sur leurs deux circonférences, fait que l'une ne peut tourner sans entraîner l'autre avec elle. Enfin, pour que les roues de la machine ne puissent tomber de dessus les rails, qui sont, comme on sait, des barres de fer saillantes au-dessus du sol, ces roues sont garnies, en-dedans, d'un rebord qui les arrête dans tout mouvement latéral sur la voie.

Ce qui précède fait comprendre comment la vapeur se forme dans la chaudière, comment elle vient agir sur les pistons, et comment l'action de ces pistons se transmet aux roues. Il reste encore à expliquer par quels moyens les tiroirs sont mis en mouvement, comment on peut à son gré faire reculer la machine au lieu de la faire avancer, et, enfin, comment cette machine peut d'elle-même alimenter sa chaudière. Ce sont les trois points dont nous allons maintenant nous occuper.

Le tiroir de chaque cylindre est mis en mouvement par un excentrique fixé sur l'axe des roues motrices de la machine, à la manière ordinaire dans presque toutes les machines à vapeur. Seulement, comme, dans les machines locomotives, il faut un second excentrique pour faire marcher au besoin la machine en arrière, il en résulte qu'il faut deux excentriques pour chaque cylindre, et c'est ce qu'on voit représenté sur la *fig.* 76. I et *i* sont les excentriques pour le cylindre de gauche, et I' et *i'* les excentriques pour le cylindre de droite. Les deux excentriques I et I' servent pour le mouvement en arrière, et les excentriques *i* et *i'* pour le mouvement en avant, c'est-à-dire que, selon ceux de ces excentriques qui sont embrayés sur la tige des tiroirs, le mouvement de la machine s'exécute soit en arrière, soit en avant, comme nous allons l'expliquer.

La *fig.* 75 fait voir la situation et l'action des deux excentriques pour le cylindre de gauche de la machine. La tige *t'* du tiroir porte à son extrémité une pièce à double fourche *mn*MN, qui se meut avec cette tige. Au fond de la fourche supérieure est une encoche *o* destinée à recevoir le boulon d'embrayage de l'excentrique *i*, pour aller en avant, et au fond de la fourche inférieure est une autre encoche O pour recevoir le boulon d'embrayage de l'excentrique I pour aller en arrière. Sur la figure, c'est l'excentrique I qui est embrayé, c'est-à-dire qui est engagé dans son encoche,

et ainsi la machine est disposée pour la marche en arrière. En effet, en examinant la position qui en résulte pour le tiroir *t*, dans les deux *fig.* 75 et 76, on reconnaîtra que ce tiroir est tiré en arrière; d'où résulte que la vapeur pénètre dans le cylindre en avant du piston ou par le port 1. Le piston recule donc dans le cylindre, et, par conséquent, d'après la position de la manivelle correspondante *g*, qui se trouve à peu près verticale et *au-dessus* de l'essieu, on reconnaîtra que cette action fait reculer la machine, ou tourner les roues motrices dans la direction de la flèche.

Pour embrayer l'autre excentrique ou produire la marche en avant, il y a, sur le côté de la boîte à feu et à portée du machiniste, un grand levier Q qu'on voit représenté sur la *fig.* 75. En tirant en arrière ce levier, dont le point fixe est en Q', le mouvement se communique à la tige *qq* et de là au levier coudé *q'xq'*, qui fait baisser la tige de suspension *q''*. Par conséquent, le boulon d'embrayage O sort de son encoche et se désembraye, tandis que le boulon *o'* descend entre les deux branches *m* et *n* de la fourche supérieure, pour s'embrayer dans l'encoche *o*; et dans cette action il pousse la branche *n*, et par suite la tige *t'*, et, enfin, le tiroir *t*, vers l'avant de la machine, d'où résulte que le tiroir découvre désormais le port 2 et recouvre au contraire le port 1, ainsi que le port d'éduction. La vapeur pénètre donc alors en arrière du piston, de sorte que celui-ci se meut en avant dans le cylindre, et, par conséquent, en agissant sur la manivelle *g*, qui est sensiblement verticale et *au-dessus* de l'essieu, il fait mouvoir en avant les roues motrices de la machine. Il est entendu que, dans le même instant et au moyen du même levier Q, des effets semblables se produisent sur les deux excentriques de l'autre cylindre, comme le montre la *fig.* 76. Ainsi, on voit qu'en tirant en arrière ou en poussant en avant le levier Q, le machiniste peut embrayer l'un ou l'autre excentrique et faire à son gré marcher la machine en avant ou en arrière; mais que, s'il place ce levier dans la position verticale, aucun des deux excentriques ne se trouve embrayé et que, par conséquent, les tiroirs cessent de se mouvoir ou de distribuer la vapeur dans les cylindres.

Sur la *fig.* 76, on distingue clairement la disposition des excentriques et des leviers, qui y sont marqués par les mêmes lettres que sur la figure précédente. On y voit de plus que les excentriques se terminent par une double pointe, dans laquelle passent les branches *m* et M, et qui leur sert de guide, pour que les boulons d'embrayage descendent exactement dans leur encoche. De même les tiroirs sont guidés dans la direction précise de leur mouvement par les deux prolongemens de leur tige, savoir, un prolongement *t''*, qui sort en avant de la boîte à vapeur, en traversant une boîte à étoupes, et une autre *t'''*, qui passe dans une ouverture faite à la traverse T.

En examinant la *fig.* 75, on doit observer que, lorsque les excentriques sont embrayés, ils sont sensiblement à angle droit sur la manivelle correspondante de l'essieu. Le but de cette disposition se comprend aisément. En effet, on sait que

le mouvement de va et vient, communiqué par le moyen d'un excentrique, est très-inégal, c'est-à-dire qu'il est très-rapide quand le rayon de l'excentrique est à angle droit sur la direction de sa tige, et très-lent quand le rayon arrive dans la direction de cette tige. D'après la perpendicularité de l'excentrique sur la manivelle de l'essieu, il s'ensuit donc que le tiroir prend un mouvement très-rapide précisément quand le piston est au fond dn cylindre, c'est-à-dire quand il convient de changer rapidement les passages de la vapeur, et un mouvement très-lent, au contraire, quand le piston est au milieu de sa course et qu'il est nécessaire de maintenir les passages ouverts sans diminution sensible. Ainsi, la disposition dont il s'agit est précisément celle qui convient à l'action de la machine.

La chaudière est alimentée par deux pompes aspirantes et foulantes semblables à celle de la *fig.* 35, *pl. V*, et qui sont placées horizontalement en-dessous de la machine; on les voit en plan dans la *fig.* 76 et en coupe dans la *fig.* 75. p est le corps de pompe; il est parcouru par un plongeur p', qui est creux et au fond duquel est attachée la tige p'', qui met la pompe en action. Cette tige est elle-même liée à l'excentrique de recul I de la machine, mais du côté opposé au tiroir; de sorte que, lorsque la machine marche en arrière, c'est le même excentrique qui conduit à la fois le tiroir de distribution de la vapeur et la pompe d'alimentation de la chaudière. Lorsque la machine marche au contraire en avant, ce sont les excentriques i, i' qui conduisent les tiroirs, et les deux autres excentriques I et I' qui conduisent les pompes. La chapelle de la pompe se voit en u dans les deux figures. Lorsque, par la rotation de l'axe des roues motrices et par l'effet de l'excentrique, le plongeur p' se retire du corps de pompe, il y produit un vide qui soulève la soupape inférieure de la chapelle, et aspire par conséquent l'eau contenue dans le tuyau de succion u', qui conduit au réservoir d'eau du tender ou fourgon d'approvisionnement. Cette eau remplit donc le corps de pompe et le tuyau aboutissant u''. Ensuite, quand le plongeur rentre dans le corps de pompe, il comprime l'eau qui y a été aspiré auparavant, ferme la soupape inférieure de la chapelle, ouvre la soupape supérieure, et fait passer l'eau dans le tuyau u''' u''' qui la conduit à l'extrémité antérieure de la chaudière, où elle pénètre par l'orifice U. Nous avons dit qu'il y a deux pompes d'alimentation fixées à la machine; l'une des deux suffit pour l'entretien de la chaudière, mais on en met deux pour qu'elles puissent se suppléer au besoin. De même, toutes deux sont toujours en action pendant le mouvement de la machine, mais elles ne peuvent faire passer de l'eau dans la chaudière que lorsque le machiniste ouvre un robinet placé sur le tuyau qui conduit de la machine au réservoir d'eau du tender. Ce robinet n'est pas représenté sur la figure.

La machine entière est solidement attachée par de fortes pattes sur un grand châssis carré YY, et celui-ci repose sur les essieux au moyen de ressorts portant sur des coussinets y, y. Ainsi la presque totalité de l'appareil se trouve suspendue, et l'on peut, en relevant plus ou moins les ressorts au moyen des écrous dont il sont

munis, distribuer le poids de la machine sur les six roues, dans la proportion qu'on juge convenable. Enfin, pour qu'on puisse facilement examiner l'état des tubes de la chaudière, de la tuyère, des cylindres et des tiroirs, la partie antérieure de la boîte à fumée n'est fermée que par une porte *zz*, qu'on peut facilement enlever en tournant seulement quelques verrous ou quelques écrous.

La machine que nous venons de décrire est destinée à tirer des marchandises, ou des charges considérables, à des vitesses modérées. Pour lui faire tirer des charges légères avec une grande vitesse, c'est-à-dire des trains de voyageurs, il faudrait lui donner des roues motrices d'un diamètre plus considérable, parce qu'à chaque double coup de piston la roue fait un tour, et qu'ainsi la machine parcourrait un plus grand espace sans accroître la vitesse du piston. De plus, il faudrait supprimer la liaison des roues motrices aux roues de derrière de la machine, parce que l'adhérence d'une paire de roues serait alors suffisante pour tirer la charge. La simplicité extraordinaire qu'on ne manquera pas de remarquer dans cette machine tient à divers perfectionnemens qui sont particuliers à M. Robert Stephenson, et qu'il a récemment introduits dans la construction des locomotives. Les principaux sont: la position verticale des tiroirs entre les deux cylindres, ce qui permet de les faire mouvoir directement par les excentriques, sans l'intermédiaire de tringles et de leviers de renvoi: le mode d'embrayage des excentriques sur une fourche montée à demeure sur la tige des tiroirs; la situation des pompes d'alimentation en arrière et dans le même plan que l'essieu coudé, ce qui donne le moyen de faire mouvoir ces pompes par une action directe des excentriques de recul; et enfin la position de la boîte à feu *en arrière* de l'essieu de derrière de la machine, d'où résulte qu'on peut donner à la chaudière beaucoup plus de longueur, et, par conséquent, plus de puissance, sans augmenter la distance qui sépare les points de support des roues extrêmes sur les rails.

Nous n'entrerons pas dans plus de détails relativement à la description des locomotives; nous dirons seulement qu'on a construit récemment de ces machines, avec des dispositions ingénieuses pour y employer la vapeur à une grande détente, particulièrement celles qui sont dues à M. Mayer, de Mulhouse, et à M. Robert Stephenson; mais nous attendrons, pour en parler, que leur usage se soit suffisamment établi dans la pratique.

ARTICLE II.

THÉORIE DES MACHINES LOCOMOTIVES.

Les machines locomotives n'étant, sous le rapport théorique, qu'une application particulière des machines à haute pression, les formules propres à calculer leurs effets seront semblables à celles qu'on a données dans le chapitre précédent. Cependant il

s'y présente, de plus, quelques circonstances accessoires que nous devons y introduire; et c'est ce qui rend nécessaire de les traiter à part.

Ces circonstances sont : 1°. que la machine est obligée de traîner son propre poids, ce qui augmente d'autant son frottement ou la force perdue pour l'effet *utile;* 2°. que la vapeur étant lancée dans la cheminée par l'orifice de la tuyère, pour y créer un courant d'air artificiel propre à activer le feu, et suppléer ainsi à l'exiguïté de la chaudière, il s'ensuit qu'une certaine force est dépensée par la machine pour chasser cette vapeur avec la vitesse nécessaire; 3°. que le train conduit par la machine ayant à lutter, dans son mouvement, contre la résistance de l'air, et cette force croissant comme le carré de la vitesse, il en résulte une résistance variable à ajouter à celles déjà considérées; 4°. enfin, que ces machines sont sujettes à une perte d'eau liquide en suspension dans la vapeur, qui excède de beaucoup le même effet dans toutes les autres machines, et, jusqu'à ce qu'on ait trouvé le moyen de remédier à ce défaut, il est nécessaire d'y avoir égard dans le calcul.

Pour tenir compte de ces diverses circonstances, nous évaluerons le frottement de la machine en y comprenant la force nécessaire pour transporter son propre poids, et nous exprimerons cette force par F, en la supposant toujours, comme auparavant, rapportée à l'unité de surface et à la vitesse du piston; en outre, nous représenterons par $p'V$ la pression, par unité de surface du piston, résultant de l'action de la tuyère, pression que, d'après nos propres expériences à ce sujet, nous supposerons proportionnelle à la vitesse de progression V de la machine; enfin, comme la résistance de l'air varie, ainsi que nous venons de le dire, en raison du carré de la vitesse du mouvement, nous exprimerons cette résistance par uV^2, en la supposant mesurée en grandeur absolue, telle que la donne l'expérience directe, et nous introduirons ces trois forces dans le calcul. Quant à la perte due à l'eau entraînée à l'état liquide dans les cylindres, nous en tiendrons compte, comme on l'expliquera plus loin, en la soustrayant de la vaporisation brute de la chaudière, pour en conclure la vaporisation effective, ou la valeur réelle de S.

Pour introduire dans le calcul les trois résistances que nous venons d'exprimer par F, pV et uV^2, il faut observer que la dernière, ou la résistance de l'air, est ici exprimée en grandeur absolue; c'est-à-dire qu'elle est mesurée par la traction qui doit être exercée pour la surmonter, à la vitesse de progression de la machine, ou à la vitesse de la circonférence des roues sur les rails. Or, on sait que les efforts exercés par la même force, en divers points d'une machine, sont en raison inverse de la vitesse des points considérés; et, d'un autre côté, la vitesse du piston est, à celle de progression de la machine, comme deux fois la course du piston est à la circonférence de la roue motrice, puisque chaque double coup de piston produit un tour de cette roue. Donc, en appelant D le diamètre des roues motrices de la machine, et π le rapport de la circonférence au diamètre, la résistance de l'air produira contre le piston un effort augmenté dans le rapport $\frac{\pi D}{2l}$, et, par conséquent, l'intensité

de cette force rapportée à la vitesse et, de plus, à l'unité de surface du piston, aura pour expression

$$\frac{\pi D}{2l} \cdot \frac{uV^2}{a}.$$

Quant au frottement et à la résistance due à la tuyère, comme ces forces sont déjà supposées rapportées à l'unité de surface et à la vitesse du piston, il n'y a aucune transformation à leur faire subir.

Cela posé, la résistance de la charge, par unité de surface du piston, que nous avions exprimée par r, sera maintenant augmentée de la résistance de l'air, ou deviendra

$$r + \frac{\pi D}{2al} uV^2;$$

la contre-pression exercée sur la surface opposée du piston, au lieu d'être simplement représentée par la pression atmosphérique, aura pour valeur

$$p + p'V,$$

et enfin, le frottement f de la machine sera maintenant remplacé par F.

Par conséquent, en se reportant au chap. V, art. II, § I, les formules (1) et (2), qui donnent la vitesse et la charge du piston, dans le cas général, deviendront

$$v = \frac{l}{l+c} \cdot \frac{S}{a} \cdot \frac{m}{(1+\delta)\left(r + \frac{\pi D}{2al} uV^2\right) + n + p + p'V + F},$$

$$ar = \frac{l}{l+c} \cdot \frac{mS}{(1+\delta)v} - \frac{a}{1+\delta}(n + p + p'V + F) - \frac{\pi D}{2l} uV^2.$$

Les quantités v et r, données par ces formules, font connaître la vitesse et la charge du *piston* de la machine; mais, comme il est beaucoup plus commode, dans la pratique, d'avoir immédiatement la vitesse de la *machine* elle-même sur les rails et la traction qu'elle est capable d'exercer à cette dernière vitesse, pour faire avancer les voitures qui portent la charge, il convient de faire, dans les formules, les substitutions convenables pour passer du premier mode de calcul au second. Pour cela, il suffit de se rappeler ce que nous avons dit un peu plus haut, savoir: que la vitesse de la machine est à celle du piston dans le rapport

$$\frac{\pi D}{2l},$$

ce qui donne d'abord

$$V = \frac{\pi D}{2l} v;$$

et ensuite, que l'effort de traction ou la charge R de la machine est à celle du piston dans le rapport inverse des mêmes vitesses, ce qui donne

$$R = \frac{2}{\pi D} ar.$$

Il suffira donc de faire ces substitutions pour obtenir les expressions desirées. En même temps, on remarquera qu'en multipliant les deux équations ci-dessus, on a

$$RV = arv;$$

par conséquent, l'effet utile de la machine sera représenté par RV, aussi bien que par *arv*. Ainsi, sans entrer dans aucune autre considération, on voit que les formules propres à calculer les effets des locomotives, soit dans le cas général, soit dans le cas du maximum d'effet utile, seront les suivantes :

CAS GÉNÉRAL.

$$V = \frac{l}{l+c} \cdot \frac{mS}{(1+\delta)(R+uV^2) + \frac{2al}{\pi D}(n+p+p'V+F)},$$

$$R = \frac{l}{l+c} \cdot \frac{mS}{(1+\delta)V} - \frac{2l}{\pi D} \cdot \frac{a}{1+\delta}(n+p+p'V+F) - uV^2,$$

$$S = \frac{l+c}{l} \cdot \frac{V}{m}\left[(1+\delta)(R+uV^2) + \frac{2l}{\pi D}a(n+p+p'V+F)\right],$$

$$\text{E. u.} = RV.$$

CAS DU MAXIMUM D'EFFET UTILE.

$$V' = \frac{l}{l+c} \cdot \frac{\pi D}{2l} \cdot \frac{mS}{a(n+P)},$$

$$R' = \frac{a}{1+\delta} \cdot \frac{2l}{\pi D}(P - p - p'V' - F) - uV'^2,$$

$$S = \frac{l+c}{l} \cdot \frac{2l}{\pi D} \cdot \frac{aV'}{m}(n+P),$$

$$\text{E. u. max.} = R'V'.$$

Dans l'application de ces formules, on remarquera que celle qui donne la vitesse, dans le cas d'une charge quelconque, contient encore au dénominateur un terme $p'V$ et un autre uV^2; mais, pour éviter la solution d'une équation du troisième degré, on fera une évaluation de la vitesse résultante, et l'on calculera ainsi une valeur approchée de chacun de ses termes, que l'on introduira comme des constantes dans l'équation, puis on en tirera une valeur de V. Avec un peu d'expérience de ces machines, le premier essai fait ainsi conduira déjà à une valeur très-appro-

chée de la quantité V. Alors on se servira du résultat de ce premier calcul pour assigner aux quantités p' V et u V^2 une nouvelle valeur plus approchée que la première, et l'on arrivera ainsi à une seconde solution, qui sera suffisamment exacte pour un très-grand nombre de cas. Si cependant le résultat montrait que l'évaluation de V, qu'on vient d'employer, est encore trop inexacte pour s'y arrêter, on se servirait du résultat précédent, comme approximation, pour un troisième calcul, et de celui-ci pour un quatrième, s'il était nécessaire.

ARTICLE III.

FORMULES PRATIQUES POUR LE CALCUL DES MACHINES LOCOMOTIVES, ET EXEMPLE DE LEUR APPLICATION.

Pour former les équations numériques propres au calcul de ces machines, il faut, dans les formules algébriques qui viennent d'être données, remplacer les constantes par les valeurs que l'expérience leur a assignées. Ce sont ces valeurs que nous allons constater d'abord.

La valeur du frottement mesuré dans plusieurs locomotives à quatre roues non couplées et à cylindres de 11 pouces de diamètre a été trouvée, dans nos expériences, de 104 livres. Mais comme ce frottement était mesuré à la vitesse de la roue ou de la machine sur les rails, qui, dans les locomotives en question, était 5.9 fois aussi grande que celle du piston, il est clair que cette force produisait sur le piston une résistance égale à $5.9 \times 104 = 614$ livres. Ainsi, comme la surface des deux pistons était de 190 pouces carrés, le frottement revenait à 3.23 livres par pouce carré de la surface du piston. Dans les locomotives à roues *couplées* et dans celles à 6 roues, le frottement est un peu plus considérable et s'élève à environ 3.40 ou 3.60 livres par pouce carré (*Traité des Locomotives*, chap. VIII, 2e édit.). Dans les calculs généraux, on peut donc prendre moyennement

$$F = 3.50 \times 144 \text{ livres par pied carré de la surface du piston.}$$

Cependant, comme le frottement de ces machines dépend de plusieurs circonstances particulières, telles que leur poids, le nombre et la nature de leurs roues et leur mode de construction en général, on ne devra adopter cette évaluation sommaire que lorsqu'on ne voudra pas recourir aux moyens plus exacts d'arriver à une déterminaison de leur frottement.

Pour comparer le frottement des locomotives avec celui des machines à vapeur stationnaires, il faut observer que, outre le frottement *propre* ou le frottement des organes mécaniques de la machine, l'évaluation précédente comprend encore le frottement de la machine *comme voiture*, c'est-à-dire la résistance que son poids

oppose à sa progression sur les rails. Or, dans une voiture à quatre roues non couplées, tirée sur des rails en bon état, cette résistance est de 6 livres par tonne du poids de la voiture. Ainsi, comme les machines de la première série, que nous venons de mentionner, étaient aussi à quatre roues non couplées et avaient un poids moyen de 8 tonnes, on voit que leur résistance comme voiture s'élevait à 48 livres. En y ajoutant donc $\frac{1}{7}$ de ce nombre, ou 7 livres, pour le frottement additionnel que cette traction de 48 livres causait dans la machine, on a enfin 55 livres pour la résistance totale provenant de leur mouvement le long des rails. Ainsi, en multipliant ce nombre par 5.9, et divisant le résultat par 190, pour rapporter la force dont il est question à la vitesse et à la surface du piston, on trouve que la résistance produite sur le piston par cette cause était de 1.71 livre par pouce carré. Par conséquent, en la déduisant du frottement total de ces machines, qui est de 3.23 livres par pouce carré, il reste enfin, pour leur frottement *propre*, pris indépendamment de leur progression sur les rails, 1.52 livre par pouce carré de la surface du piston.

On verra plus loin que ce frottement diffère à peine de celui d'une machine de Watt à double effet de mêmes dimensions, et si l'on a égard à la circonstance que les locomotives n'ont ni pompe d'air ni pompe d'eau froide, on trouvera la coïncidence plus considérable encore.

Relativement à la quantité δ, ou au frottement additionnel que subissent les machines, par unité de la charge qu'elles tirent, il résulte de nos expériences à ce sujet (*Traité des locomotives*, chap. VIII) que, quand une locomotive surmonte une résistance donnée, le surplus de frottement produit dans la machine s'élève à 0.14, ou environ $\frac{1}{7}$ de cette résistance. On a donc

$$\delta = 0.14.$$

La pression due à la tuyère varie non-seulement avec la vitesse du piston, mais encore avec la vaporisation de la chaudière par minute et la grandeur d'orifice de la tuyère, ainsi qu'on le verra par les expériences développées dans notre *Traité des locomotives;* mais, pour simplifier les formules, nous rapporterons ici cet effet à la vaporisation moyenne des machines et à la grandeur d'orifice adoptée dans la pratique. Avec ces dimensions et données moyennes, on trouve que, quand la vitesse de la machine est de 10 milles par heure ou de 880 pieds par minute, la pression due à la tuyère est de 1.75 lb par pouce carré de la surface du piston, et qu'elle varie en raison directe de la vitesse du mouvement; d'où l'on déduit, en la rapportant au pied carré,

$$p' V = 1.75 \times 144, \text{ pour } V = 880,$$

et par conséquent

$$p' = \frac{1.75}{880} \times 144 = 0.2864 \text{ lb.}$$

Quant au choc de l'air, d'après les expériences spéciales sur ce sujet, la résistance qui en résulte, outre la machine, est représentée par l'expression

$$0.002687\,\Sigma\, V_1^2,$$

dans laquelle V_1 est la vitesse de la machine, en milles par heure, et Σ la surface *effective* présentée par le train en mouvement, savoir, 70 pieds carrés pour la surface de section et en outre 10 pieds carrés par voiture, y compris la machine et son fourgon d'approvisionnement (*Traité des locomotives,* chap. IV, § II). Or, la vitesse de la machine, exprimée en milles par heure, est à la même vitesse exprimée en pieds par minute, dans le rapport $\frac{60}{5280}$, puisque une heure contient 60 minutes, et qu'un mille contient 5280 pieds. On a donc

$$V_1^2 = \left(\frac{60}{5280}\right)^2 V^2;$$

et, par conséquent, la résistance de l'air peut s'écrire sous la forme

$$uV^2 = 0.002687\left(\frac{60}{5280}\right)^2 \Sigma V^2,$$

qui donne

$$u = 0.000000347\,\Sigma.$$

Relativement à l'eau entraînée à l'état liquide et mêlée avec la vapeur, nous avons dit que cette perte est très-considérable dans les locomotives. Effectivement, d'après nos propres expériences à ce sujet, l'eau ainsi perdue s'élève moyennement à 0.24 de la vaporisation brute de la chaudière (*Traité des locomotives*, chap. X, § VII). Cette circonstance est due aux secousses violentes de la machine, qui précipitent l'eau dans l'ouverture du tube à vapeur, au peu d'élévation de la prise de vapeur au-dessus du niveau de l'eau, ce qui facilite le même effet, à la petitesse de l'espace réservé à la vapeur pour son accumulation, à l'exiguïté de la chaudière comparée à la masse de vapeur qu'elle produit, et, par conséquent, à l'énorme rapidité avec laquelle cette vapeur traverse l'eau dont elle se dégage; enfin, à la largeur excessive des passages de la vapeur et à quelques autres causes de moindre importance. L'effet de ce concours de circonstances est tel que, dans certains cas, c'est une véritable pluie qui tombe de la cheminée. Pour tenir compte de ce défaut des locomotives, nous prendrons donc la vaporisation effective à 0.76 de la vaporisation brute de la chaudière.

Enfin, les machines locomotives étant sans condensation, les valeurs de m et n, qui leur conviennent, sont

$$m = 4{,}348{,}000,$$
$$n = 620;$$

de plus, le rapport de la circonférence au diamètre a pour valeur $\pi = 3.1416$, la

liberté du cylindre, $c = 0.05\,l$, et la pression atmosphérique, $p = 2118$ lbs par pied carré.

En introduisant donc ces valeurs dans les formules algébriques ci-dessus, elles deviennent :

Formules pratiques pour les machines locomotives (mesures anglaises).

CAS GÉNÉRAL.

$$V = \frac{4{,}348{,}000\,S}{1197\,R + 0.668\,\frac{al}{D}(2738 + F) + 0.191\,\frac{al}{D}V + 0.000\,000\,415\,\Sigma V^2}.$$

Vitesse de la machine, en pieds, par minute.

$$R = 3{,}632{,}500\,\frac{S}{V} - 0.558\,\frac{al}{D}(2738 + F) - 0.160\,\frac{al}{D}V - 0.000\,000\,347\,\Sigma V^2.$$

Effort de traction, ou charge utile de la machine, en livres.

$$S = \frac{V}{4{,}348{,}000}\left[1.197\,R + 0.668\,\frac{al}{D}(2738 + F) + 0.191\,\frac{al}{D}V + 0.000\,000\,415\,\Sigma V^2\right].$$

Vaporisation effective, en pieds cubes d'eau, par minute.

$\text{E. u.} = RV$. . . . . Effet utile, en livres élevées à 1 pied, par minute.

$\text{E. u. ch.} = \frac{RV}{33000}$. . . . . Effet utile, en chevaux.

$\text{E. u. 1 lb. co.} = \frac{RV}{N}$. . . . . Effet utile de 1 livre de combustible, en livres élevées à 1 pied.

$\text{E. u. 1 p. e.} = \frac{RV}{S}$. . . . . Effet utile de 1 pied cube d'eau vaporisée, en livres élevées à 1 pied.

$\text{Q. co. pr. 1 ch.} = \frac{33000\,N}{RV}$. . . . . Quantité de combustible, en livres, qui produit l'effet d'un cheval.

$\text{Q. e. pr. 1 ch.} = \frac{33000\,S}{RV}$. . . . . Quantité d'eau, en pieds cubes, qui produit l'effet d'un cheval.

$\text{E. u. ch. pr. 1 lb. co.} = \frac{RV}{33000\,N}$. . . . . Effet utile, en chevaux, produit par livre de combustible.

$\text{E. u. ch. pr. 1 p. e.} = \frac{RV}{33000\,S}$. . . . . Effet utile, en chevaux, produit par pied cube d'eau vaporisée.

CAS DU MAXIMUM D'EFFET UTILE.

$V' = \frac{D}{l} \cdot \frac{S}{a} \cdot \frac{6{,}504{,}600}{620 + P}$. . . . . Vitesse de la machine, en pieds, par minute.

$R' = 0.538 \frac{al}{D} (P - 2118 - F) - 0.160 \frac{l}{D} aV' - 0.000\,000\,347\, \Sigma V'^2$. . . . . . Effort de traction, ou charge utile maximum de la machine, en livres.

$S = aV' \frac{l}{D} \cdot \frac{620 + P}{6{,}504{,}600}$. . . . Vaporisation effective, en pieds cubes d'eau, par minute.

E. u. max. $= R'V'$. . . . . Effet utile, en livres élevées à 1 pied, par minute.

Nous ne donnons pas, pour le cas du maximum d'effet utile, la force en chevaux, ni les autres modes d'exprimer l'effet de la machine, parce que les formules qui servent à ces déterminations sont les mêmes que celles du cas général, ce qui nous dispense de les répéter ici.

Nous avons fait remarquer un peu plus haut que la formule qui donne la valeur de la vitesse, dans le cas d'une charge quelconque, contient encore deux termes, l'un fonction de V, et l'autre fonction de V^2, que nous y avons laissé subsister, afin d'éviter l'équation du troisième degré, qui en serait résultée sans cela. Nous avons expliqué comment on résoudra la formule sous sa forme actuelle, en fesant une évaluation probable de ces deux termes.

La formule qui sert à déterminer la charge pour une vitesse donnée présente une difficulté semblable. En effet, cette formule contient la quantité Σ, qui exprime la surface effective présentée au choc de l'air par le train, et nous avons vu que cette surface dépend du nombre des voitures du train, et, par conséquent, de la charge R elle-même, qui est inconnue. Il faudra donc encore faire d'abord une évaluation probable de la charge R, en conclure le nombre des wagons que cette charge suppose, et la valeur correspondante de Σ. Puis on fera le calcul avec cette évaluation, et si la valeur de R, ainsi obtenue, montre que l'évaluation de Σ n'était pas suffisante, on refera celle-ci plus exactement, et ainsi de suite. Du reste, en faisant l'essai d'un de ces calculs, on s'apercevra que ce procédé est beaucoup plus court et plus facile qu'il ne semble au premier aperçu, parce qu'il n'y a jamais, pour arriver à une nouvelle approximation, qu'un seul terme à changer. Pour connaître le nombre des wagons qui correspond à une charge donnée R, il faut transformer cette charge en tonnes tirées par la machine, et pour cela il suffit de diviser par 6, attendu que la traction d'une tonne exige une force de 6 livres. Ensuite, comme le poids d'un wagon chargé est ordinairement de 5 tonnes, il faudra prendre le cinquième du nombre trouvé, pour en conclure le nombre des voitures correspondant à la charge en question.

Pour montrer maintenant un exemple de l'application de ces formules, nous supposerons une machine semblable à la locomotive *Atlas*, qui a les dimensions et capacités suivantes (*Traité des Locomotives*, chap. I, art. II, § II):

2 cylindres de 12 pouces de diamètre, ou $a = 1.57$ pied carré.

Course du piston, 16 pouces, ou $l = 1.33$ pied.

Liberté du cylindre, $\frac{1}{20}$ de la course; ou $c = 0.05\ l$.
Roues, 5 pieds de diamètre, couplées.
Pression totale dans la chaudière, 65 lbs par pouce carré; ou $P = 65 \times 144$ lbs par pied carré.
Vaporisation brute, 50 pieds cubes d'eau par heure; ou, vaporisation effective, $S = 0.653$ pied cube par minute.
Consommation de combustible dans le même temps, 9.75 lbs; ou $N = 9.75$.
Frottement de la machine, 3.62 livres par pouce carré; ou $F = 3.62 \times 144$ lbs.

En effectuant donc le calcul avec ces données, on trouve les résultats suivans, à la vitesse du maximum d'effet utile et aux vitesses de 250 et 300 pieds par minute, pour le piston, qui correspondent à 1768 et 1473 pieds par minute pour la machine.

			Maximum d'effet utile.
V.	= 1768	... 1473	... 986
R.	= 247	... 512	... 1528
S.	= 0.653	... 0.653	... 0.653
E. u.	= 436,190	... 753,500	... 1,309,500
E. u. ch.	= 13	... 23	... 40
E. u. 1 lb. co. . . .	= 44,740	... 77,280	... 134,290
E. u. 1 p. e.	= 689,100	... 1,190,400	... 2,068,400
Q. co. pr. 1 ch. . .	= 0.74	... 0.43	... 0.25
Q. e. pr. 1 ch. . .	= 0.048	... 0.028	... 0.016
E. u. ch. pr. 1 lb. co.	= 1.36	... 2.34	... 4.07
E. u. ch. pr. 1 p. e.	= 21	... 36	... 63

Si l'on voulait rapporter ces résultats aux mesures ordinaires sur les chemins de fer, c'est-à-dire compter la vitesse en milles par heure, et la charge en tonnes tirées le long des rails, il faudrait multiplier les vitesses par le facteur $\frac{60}{5280}$, puisqu'un mille contient 5280 pieds, et qu'une heure contient 60 minutes. Le résultat de cette multiplication ferait d'abord passer de la vitesse de la machine en pieds par minute, à la même vitesse en milles par heure.

Ensuite, pour passer des efforts de traction en livres, qui viennent d'être calculés plus haut, aux charges de la machine en tonnes, il faudrait diviser les premiers par le nombre 6, parce que la traction d'une tonne, sur un rail-way *de niveau*, exige une force de 6 livres.

Ainsi, les trois cas rapportés plus haut seraient alors exprimés comme il suit:

Vitesses. . . .	20.11	... 16.76	... 11.22 milles par heure,
Charges. . . .	41	... 85	... 221 tonnes brutes;

et les autres résultats ne seraient pas changés. Les charges données ici comprennent le poids du fourgon d'approvisionnement de la machine, qui est d'environ 6 tonnes.

Nous ferons toutefois remarquer que ces effets seront ceux de la machine, pour les données introduites dans le calcul. Mais en forçant le feu pour augmenter la va-

porisation S, ou en augmentant la pression P de la vapeur dans la chaudière, on fera produire à la machine des effets plus considérables ; et au contraire les effets seront moindres si la vaporisation de la chaudière est moindre que 0.633 pied cube par minute, ou s'il se perd une partie de la vapeur par les soupapes de sûreté. En outre, il peut encore y avoir des variations dues à l'accroissement de vaporisation de la machine, en raison de sa vitesse, aux effets de l'avance du tiroir, au passage des courbes ou des pentes, et à diverses autres circonstances qu'il serait trop long de développer ici ; mais nous renvoyons à cet égard à notre *Traité des Machines locomotives*.

En comparant les résultats que nous venons d'obtenir pour une locomotive et une machine à vapeur stationnaire à haute pression, on reconnait les désavantages qu'éprouvent les locomotives, en raison des circonstances que nous avons mentionnées : la nécessité de se transporter elles-mêmes, la résistance de l'air contre le train à de grandes vitesses, et la force consommée pour attiser le feu dans un foyer de petites dimensions, au moyen de la tuyère.

Si l'on veut obtenir les mêmes formules pratiques rapportées aux mesures françaises, il suffit d'observer qu'alors on a

Frottement de la machine sans charge, 0.2459 kilogramme par centimètre carré de la surface du piston ; ou $F = 2459$ kilogrammes par mètre carré.

Frottement additionnel par unité de la résistance, $\frac{1}{7}$ de cette résistance ; ou $\delta = 0.14$.

Pression due à la tuyère, 0.123 kilogramme par centimètre carré, à la vitesse de 268 mèt. par minute pour la machine ; ce qui donne $p' = 4.57$ kilogrammes par mètre carré de la surface du piston.

Résistance de l'air représentée par l'expression

$$uV^2 = 0.000\,01823\,\Sigma V^2,$$

dans laquelle Σ, ou la surface *effective* du train, a pour valeur 6.50 mètres carrés, augmentés de 0.93 mètre carré pour chaque voiture du train, y compris la machine.

En outre, on a encore

$$m = 21{,}232{,}000,$$
$$n = 3020,$$
$$c = 0.05l,$$
$$p = 10335,$$
$$\pi = 3.1416.$$

En substituant ces valeurs, les formules deviennent :

Formules pratiques pour les machines locomotives (mesures françaises).

CAS GÉNÉRAL.

$$V = \frac{21{,}232{,}000\,S}{1.197\,R + 0.668\,\frac{al}{D}\,(13335 + F) + 3.052\,\frac{al}{D}\,V + 0.000\,021\,82\,\Sigma V^2}.$$

Vitesse de la machine, en mètres, par minute.

$$R = 17{,}738{,}000\,\frac{S}{V} - 0.558\,\frac{al}{D}\,(13333 + F) - 2.550\,\frac{al}{D}\,V - 0.000\,01823\,\Sigma V^2.$$

Effort de traction, ou charge utile de la machine, en kilogrammes.

$$S = \frac{V}{21{,}232{,}000}\left[1.197\,R + 0.668\,\frac{al}{D}\,(13333 + F) + 3.052\,\frac{al}{D}\,V + 0.000\,02182\,\Sigma V^2\right].$$

Vaporisation effective, en mètres cubes, d'eau par minute.

$E.u. = RV$. . . . . Effet utile, en kilogrammes élevés à 1 mètre, par minute.

$E.u.ch. = \frac{RV}{4500}$. . . . . Effet utile, en chevaux.

$E.u.1\,k.co. = \frac{RV}{N}$. . . . . Effet utile de 1 kilogramme de combustible, en kil. élevés à 1 mètre.

$E.u.1\,m.e. = \frac{RV}{S}$. . . . . Effet utile de 1 mètre cube d'eau vaporisée, en kilog. élevés à 1 mèt^{re}.

$Q.co.pr.1\,ch. = \frac{4500\,N}{RV}$. . . . . Quantité de combustible, en kilog., qui produit l'effet d'un cheval.

$Q.e.pr.1\,ch. = \frac{4500\,S}{RV}$. . . . . Quantité d'eau, en mètres cubes, qui produit l'effet d'un cheval.

$E.u.ch.pr.1\,k.co. = \frac{RV}{4500\,N}$. . . . . Effet utile, en chevaux, produit par kilogramme de combustible.

$E.u.ch.pr.1\,m.e. = \frac{RV}{4500\,S}$. . . . . Effet utile, en chevaux, produit par mètre cube d'eau vaporisée.

CAS DU MAXIMUM D'EFFET UTILE.

$V' = \frac{D}{l} \cdot \frac{S}{a} \cdot \frac{31{,}763{,}000}{3020 + P}$. . . . . . . Vitesse de la machine, en mètres, par minute.

$$R' = 0.558\,\frac{al}{D}\,(P - 10333 - F) - 2.550\,\frac{al}{D}\,V' - 0.000\,01823\,\Sigma V'^2.$$

Effort de traction, ou charge utile maximum de la machine, en kilogrammes.

$S = aV' \cdot \frac{l}{D} \cdot \frac{3020 + P}{31{,}763{,}000}$. . . . . . . Vaporisation effective, en mètres cubes d'eau, par minute.

$E.u.max. = R'V'$. . . . . Effet utile, en kilogrammes élevés à 1 mètre, par minute.

Si l'on veut soumettre au calcul la même machine, dont nous avons donné plus haut les dimensions, on aura, en mesures françaises,

2 cylindres de 30.5 centimètres de diamètre; ou $a = 0.1458$ mètre carré.

Course du piston, $l = 0.4064$ mètre.

Liberté du cylindre, $\frac{1}{20}$ de la course ; ou $c = 0.05l$.

Roues, 1.524 mètre de diamètre, couplées.

Pression totale dans la chaudière, 4.568 kilogrammes par centimètre carré ; ou P = 45680 kilogrammes par mètre carré.

Vaporisation effective, 0.017922 mètre cube d'eau par minute.

Consommation de coke dans le même temps, 4.421 kilogrammes.

Frottement de la machine, 0.2544 kilogramme par centimètre carré de la surface du piston ; ou F = 2544 kilogrammes par mètre carré.

Avec ces données, les effets de la machine seront, selon la vitesse du piston, ceux du tableau suivant :

			Maximum d'effet utile
V. . . . . =	539	... 449	... 301
R. . . . . =	112	... 232	... 602
S. . . . . =	0.017922	... 0.017922	... 0.017922
E. u. . . . . =	60,535	... 104,130	... 181,040
E. u. ch. . . . . . . =	13	... 23	... 40
E. u. 1 k. co. . . . =	13,690	... 23,550	... 40,950
E. u 1 m. e. . . . . =	3,377,600	... 5,810,100	... 10,101,600
Q. co. pr. 1 ch. . . =	0.329	... 0.191	... 0.110
Q. e. pr. 1 ch. . . . =	0.00133	... 0.00077	... 0.00043
E. u. ch. pr. 1 k. co. =	3.04	... 5.23	... 9.10
E. u. ch. pr. 1 m. e. =	751	... 1291	... 2245

CHAPITRE VII.

MACHINES DE WATT A DOUBLE ACTION,

OU

MACHINES A DOUBLE ACTION, A BASSE PRESSION ET A CONDENSATION, SANS DÉTENTE.

§ I. *Description d'une machine de ce système, pour manufactures.*

Les machines de Watt à double action sont des *machines à double action*, *à basse pression et à condensation*, *sans détente*. La vapeur est formée dans la chaudière sous une pression qui excède la pression atmosphérique d'environ 1.5 à 3 livres par pouce carré, ou de 0.1 à 0.2 kilogramme par centimètre carré. Elle passe ensuite dans le cylindre, où elle est admise sans interruption pendant toute la durée de la course du piston. Quand le piston a terminé une de ses courses, si c'est la course descendante, une communication s'ouvre entre le haut du cylindre et le condenseur. La vapeur qui remplissait le haut du cylindre passe donc aussitôt dans le condenseur, et il ne reste sur la surface supérieure du piston qu'une pression très-faible due à la condensation imparfaite de la vapeur. Mais, dans le même instant, la communication de la chaudière au cylindre se trouve intervertie, et la vapeur, au lieu de continuer à arriver au-dessus du piston, arrive maintenant au-dessous. Elle repousse donc le piston vers le haut du cylindre; puis elle est condensée à son tour, tandis qu'une nouvelle quantité de vapeur est admise au-dessus du piston, et ainsi de suite. Le mouvement alternatif ainsi communiqué au piston se change, au moyen d'une manivelle, en un mouvement de rotation imprimé à un volant, qui le transmet enfin aux diverses pièces du mécanisme dont on veut faire usage dans les arts. Cette circonstance fait aussi désigner ces machines par le nom de machines *rotatives*, qu'il ne faut pas confondre avec celui de machines *à rotation immédiate*, ainsi qu'on l'a expliqué chap. IV, art. I, § I.

La chaudière des machines de Watt est ordinairement de la forme dite *wagon*, c'est-à-dire semblable à celle des *fig.* 11 et 12, *pl. II*; elle est placée dans une chambre attenante à celle la machine, et seulement séparée de celle-ci par un mur. La *pl. XIV*, où les mêmes lettres se rapportent aux mêmes objets dans les trois figures, repré-

sente une machine de ce système construite par M. W. Fairbairn, de Manchester, dont le nom est trop connu pour qu'il soit besoin d'en faire l'éloge.

Le cylindre est représenté en C. La vapeur arrive de la chaudière par le tube S, et traverse d'abord une soupape à gorge contenue dans la boite *a* (*fig.* 77 *bis* et 77 *ter*), c'est-à-dire un passage intercepté plus ou moins complètement par un disque circulaire, continuellement manœuvré par le gouverneur à force centrifuge, ainsi qu'on l'expliquera plus loin. Ensuite la vapeur traverse encore une soupape régulatrice a' a' (*fig.* 77 *ter*), qui est à double siége, comme on le voit sur la figure. Cette forme lui donne l'avantage de se fermer et de s'ouvrir sans résistance, et ainsi on la règle facilement à la main, au moyen de la tringle a'' et d'un écrou à manivelle a'''. Cette soupape sert à suspendre complètement l'arrivée de la vapeur quand on veut arrêter la machine, et en outre à fixer, selon le travail à exécuter, le maximum du passage accordé à la vapeur; de sorte que les variations permanentes de ce passage sont réglées à la main au moyen de la soupape régulatrice, et que ses variations accidentelles sont réglées par la machine elle-même au moyen de la soupape à gorge. La disposition qui précède permet de construire la machine avec des passages extrêmement larges, mais de ne leur conserver dans le travail que la grandeur qui convient à la charge qui doit être mise en mouvement.

En sortant de la soupape régulatrice, la vapeur pénètre dans la colonne à vapeur A, qui la conduit aux deux boites à tiroir *b* et b' (*fig.* 77). Celles-ci sont divisées chacune en deux compartimens par une cloison horizontale, et la colonne à vapeur A communique avec le compartiment supérieur de la boite d'en haut et avec le compartiment inférieur de la boite d'en bas, par deux passages *x* et x', ainsi qu'on le reconnait sur la *fig.* 77 *ter*. Les deux autres compartimens des boites à tiroir, c'est-à-dire le compartiment inférieur de la boite d'en haut et le compartiment supérieur de la boite d'en bas, communiquent, au contraire, par les deux passages *y* et y', avec la colonne d'éduction E qui conduit au condenseur. Enfin le tiroir est composé de deux demi-cylindres creux *d*, d' (*fig.* 77 et 77 *ter*) réunis par une tige verticale d'', et se mouvant à frottement doux dans les ouvertures des cloisons de séparation de chacune des deux boites à tiroir. Ces deux demi-cylindres sont fermés à leur partie inférieure, par un fond plat, de sorte que quand le tiroir est levé, comme il est représenté sur les figures, le demi-cylindre supérieur *d* intercepte la communication entre le port 1 du cylindre de la machine et l'entrée *x* de la colonne à vapeur, mais la laisse libre avec l'entrée *y* de la colonne d'éduction (*fig.* 77 *ter*); et que, dans le même instant, le demi-cylindre d'en bas d' se trouvant élevé au-dessus du port inférieur 2 du cylindre, le découvre complètement, et par conséquent établit une communication entre le cylindre de la machine et l'entrée x' de la colonne à vapeur, mais l'intercepte au contraire avec l'entrée y' de la colonne d'éduction. Il en résulte donc que, lorsque le tiroir est dans la position marquée, la vapeur de la chaudière passe de la colonne A dans le cylindre à vapeur par le port

inférieur 2, et que, dans le même instant, la vapeur inutile sort du cylindre par le port 1 et passe dans la colonne d'éduction E, qui la conduit au condenseur. Le contraire a lieu quand le tiroir est baissé; c'est-à-dire que la vapeur entre alors dans le cylindre par le port 1 et en ressort par le port 2. Ainsi, selon la position du tiroir, la vapeur de la chaudière pénètre, soit au-dessous, soit au-dessus du piston; et, par conséquent, en fesant alternativement monter et descendre le tiroir, on fait exécuter au piston des mouvemens semblables. Pour que, dans ces mouvemens du tiroir, la vapeur ne puisse s'échapper autour des deux demi-cylindres d, d', il y a des vis de pression d'', d'', d'', d'', qui servent à serrer convenablement un étoupage établi autour de ces deux pièces, comme on le reconnait sur les *fig.* 77 et 77 *ter.*

La tige du piston, qui est métallique, s'articule sur l'extrémité T du grand balancier de la machine, de manière qu'à mesure que le piston à vapeur monte et descend dans le cylindre, l'extrémité opposée F du grand balancier exécute des oscillations contraires. Ainsi, comme cette extrémité porte une bielle f, qui est attachée à une manivelle f' montée sur un arbre horizontal G, il s'ensuit que les mouvemens alternatifs du piston, en se transmettant à la bielle et à la manivelle, communiquent un mouvement de rotation à l'arbre G. Enfin celui-ci porte le volant dont les effets ont été décrits chap. III, § VII, et communique le mouvement définitif aux pièces de mécanisme nécessaires à l'opération industrielle de la machine. Ici le volant lui-même sert de roue dentée pour communiquer le mouvement.

Nous avons dit que la vapeur inutile s'échappe du cylindre par le tube d'éduction E, qui la conduit au condenseur H. Celui-ci, dont nous avons déjà parlé avec détail, est un vase hermétiquement fermé, afin que l'air n'y puisse pénétrer de l'extérieur; et un robinet, que l'on peut ouvrir plus ou moins à volonté, au moyen d'une manivelle et d'un système de leviers de renvoi h', h'', h''' (*fig.* 77 *bis*), laisse jaillir dans l'intérieur, une quantité d'eau froide suffisante pour opérer la condensation de toute la vapeur qui provient du cylindre. Cette eau pénètre dans le condenseur par le tube d'injection h_1. Dès que la vapeur est condensée, elle s'amasse à l'état liquide au fond du condenseur, et il suffit de l'en retirer à mesure de sa formation, pour que l'action de la machine puisse être continuée indéfiniment.

Pour cela, une pompe appelée pompe d'air, parce qu'elle enlève l'air dégagé de l'eau de la chaudière pendant son ébullition, aussi bien que l'eau formée par la condensation de la vapeur, est établi en I près du condenseur. Cette pompe consiste en un piston à clapets i, qui se meut dans un cylindre ou corps de pompe vertical. Quand ce piston monte, il fait le vide dans la partie inférieure du corps de pompe. Alors le clapet de pied i'' se soulève. et l'eau et les gaz amassés dans le condenseur passent dans la pompe d'air. Puis, quand le piston redescend, il comprime l'air au-dessous; ainsi le clapet i'' se referme, les clapets i', i' se soulèvent, et les produits du condenseur passent au-dessus du piston. Enfin, quand celui-ci monte de nouveau, les clapets i', i' retombent sur leur siége, ferment le passage,

et, par conséquent, les liquides et les gaz puisés au fond du corps de pompe sont amenés à sa partie supérieure. En continuant d'être soulevés par le piston, ils ouvrent le clapet de décharge *k*, sortent de la pompe d'air, et passent dans le réservoir d'eau chaude qui est représenté en K. Comme tous les clapets ne s'ouvrent que dans le sens de la sortie de l'eau, celle-ci ne peut jamais rentrer dans les vases d'où elle a été une fois enlevée. Ainsi, on voit que, par ce moyen, l'eau de condensation, ainsi que l'air dégagé de l'eau pendant son ébullition dans la chaudière, sont retirés du condenseur à mesure de leur accumulation, et la machine continue son effet sans interruption. La pompe d'air a un diamètre suffisant pour assurer son action efficace, et elle est mise en jeu par une tige passant dans une boîte à étoupes et suspendue au grand balancier de la machine. On remarque en outre, dans les trois figures, un tube *oo*, qui communique avec le condenseur et la colonne à vapeur A. Ce tube sert à *souffler* la machine au commencement du travail, c'est-à-dire à expulser, au moyen de la vapeur, qu'on laisse arriver de la chaudière, l'air qui a pénétré dans le condenseur et l'eau qui s'y est formée par la condensation pendant le chômage de la machine. Cette opération a été expliquée chap. III, § VI, en décrivant la soupape à souffler.

La tige du piston à vapeur et celle de la pompe d'air sont maintenues dans la direction précise de leurs cylindres respectifs, au moyen du *parallélogramme* T*t* T' *t'*, dont nous avons déjà expliqué le principe et les effets, chap. III, § V. Pour cela, la tige T*t* est articulée à ses deux extrémités, ainsi que la tige T'*t'*. En outre, l'angle *t'* du parallélogramme est attaché par une bride *t'* R, ici cachée derrière la tige *t' t*, à un tenon R fixé sur le châssis immobile de la machine; et cette bride a une longueur égale à OT'. Il résulte de cette disposition, qu'à mesure que le point T' est écarté à droite ou à gauche de la verticale de la pompe d'air, par les oscillations du balancier, la résistance de la bride R*t'* déforme le parallélogramme, et tire le point *t'* d'une quantité égale et en sens contraire du point T'. Les deux points T' et *t'* se trouvent donc déplacés symétriquement des deux côtés de la verticale, et, par conséquent, le milieu *i''* de la barre qui les joint n'éprouve aucune déviation sensible. Donc d'abord, si l'on choisit ce point *i''* pour y suspendre la tige de la pompe d'air, cette tige sera constamment maintenue dans la direction de l'axe de la pompe. Mais, de plus, si l'on a pris le point T' au milieu de la longueur OT, en menant par les points O et *i''* une ligne droite, cette ligne viendra couper la barre T*t* au point *t*, et cela aura lieu quelle que soit la position du balancier, puisque l'on aura toujours T*t* : T' *i''* :: OT : OT'. Donc les deux triangles OT*t* et OT' *i''* seront toujours semblables, et, par conséquent, le point *t* décrira une ligne en tout semblable à celle que décrit le point *i''*, c'est-à-dire décrira une droite verticale. Par conséquent, la tige du piston à vapeur, étant suspendue en *t*, se trouvera maintenue, comme celle de la pompe d'air, dans la direction verticale du cylindre.

On a vu que l'eau enlevée du condenseur par la pompe d'air est versée dans le

réservoir d'eau chaude K. Elle en est ensuite puisée de nouveau par la pompe d'alimentation ou d'eau chaude k' (*fig.* 77), qui est également mise en jeu par le grand balancier de la machine, au moyen de la tige de suspension k'' articulée sur le balancier au point T''. Cette pompe aspire l'eau du réservoir d'eau chaude par une soupape inférieure, et la refoule par une soupape supérieure, dans le tuyau d'alimentation qui la conduit à la chaudière, ainsi qu'il a été expliqué chap. III, § II, et représenté *fig.* 35, *pl. V*. Le tuyau z sert à l'écoulement du surplus d'eau chaude.

L'action du condenseur exige une alimentation continuelle d'eau froide, pour opérer la condensation de la vapeur, à mesure qu'elle sort du cylindre à vapeur. Cette alimentation est fournie par une troisième pompe appelée pompe d'eau froide, qui tire l'eau d'un puits pour la transmettre au condenseur. La pompe d'eau froide est mise en action par le grand balancier, de la même manière que la pompe d'eau chaude; mais, quand la machine se trouve pourvue d'eau froide sans secours artificiels, cette partie de l'appareil se trouve naturellement supprimée.

Nous avons vu que la distribution successive de la vapeur, au-dessus et au-dessous du piston, est opérée par les déplacemens alternatifs du tiroir. Le mouvement de ce tiroir est exécuté par la machine elle-même, au moyen d'un excentrique L, vu partiellement sur la *fig.* 77, et semblable à celui qui a été décrit chap. III, § IV, et qui est représentée *fig.* 49, *pl. VII*. Il consiste en une poulie, fixée sur l'arbre G de la machine et tournant avec lui, mais dont le centre ne coïncide pas avec celui de l'arbre; de sorte que, pendant la rotation, le centre de l'excentrique passe successivement à droite et à gauche de celui de l'arbre. Autour de l'excentrique est monté un collier qui embrasse sa circonférence, mais assez librement pour que l'un puisse tourner dans l'autre. Au moyen de cette disposition, l'excentrique est entraîné par l'arbre dans sa rotation; mais le collier, retenu par la tige qui le lie au tiroir, ne peut tourner; et, par conséquent, il est simplement tiré à droite et à gauche, à mesure que le centre de l'excentrique passe d'un côté à l'autre de l'arbre. Ce mouvement alternatif se communique du collier à la tige de l'excentrique l, et de celle-ci à un axe horizontal l', qui le transmet, par la bielle de jonction l'', à un second axe horizontal m, au moyen d'un petit bras de levier vertical fixé sur cet axe. Ainsi le levier m' se trouve levé et baissé alternativement, et comme il est articulé sur le prolongement n de la tige du tiroir, il s'ensuit qu'il communique définitivement au tiroir le mouvement vertical alternatif qui convient à la distribution de la vapeur. Pour que la tige n puisse pénétrer dans la boîte à tiroir, sans y laisser entrer l'air extérieur, cette tige est enfermée dans une boîte à étoupes ou étui $n'n'$, qui se meut avec elle, en embrassant le tube qui conduit dans l'intérieur. Le poids du tiroir est d'ailleurs équilibré, autour de l'axe horizontal m, par le contrepoids q, qui fait que la machine n'a, pour soulever le tiroir, qu'un simple frottement à vaincre. Le même axe porte encore des leviers qui permettent de mouvoir le tiroir indépendamment de l'excentrique, quand celui-ci est désembrayé.

Le règlement de la machine se fait par la machine elle-même, au moyen d'un gouverneur à force centrifuge P. C'est un pendule conique dont la rotation sur son axe est produite par l'abre G au moyen de deux roues d'angle. Quand la machine a sa vitesse régulière, les deux boules du pendule ont un certain écartement normal; mais, par l'effet de la force centrifuge, cet écartement augmente dès que la machine prend une vitesse plus grande, et elle diminue au contraire quand elle prend une vitesse plus petite. D'autre part, l'écartement des boules soulève ou baisse un collier mobile, monté librement sur l'axe vertical p, et ce mouvement se transmet par les tringles p', p'', p''' (*fig.* 77), à la poignée de la soupape à gorge, qui règle l'admission de la vapeur dans le cylindre. Dès que la vitesse du volant prend un léger accroissement, la soupape à gorge commence donc à fermer graduellement l'entrée de la vapeur, et par conséquent la tendance de la machine à augmenter sa vitesse se trouve arrêtée. Un effet contraire se produit quand la vitesse du volant diminue; ainsi la machine tend à garder autant que possible une vitesse uniforme. C'est ce que nous avons développé, avec plus de détails, chap. III, § VII.

§ II. *Description d'une machine de ce système, pour bateau à vapeur.*

Comme les machines de ce système sont celles qu'on emploie le plus ordinairement pour les bateaux à vapeur, nous donnerons encore ici la description succincte d'une machine destinée à cet usage, et sortie des célèbres ateliers de MM. Fawcett et Preston, de Liverpool.

La machine est représentée en coupe, plan et élévation, dans les *pl. XXII* et *XXIII*, où les mêmes lettres se rapportent aux mêmes objets. C'est une machine sans balanciers, disposition dont nous expliquerons les avantages un peu plus loin, en ce qui concerne les machines destinées à la navigation.

AAA (*fig.* 94) est la plaque de fondation de la machine, B le cylindre, b son couvercle, et C le piston, qui est métallique. Au sommet de la tige c du piston est fixée une traverse en croix DDDD (*fig.* 96) dont les quatre extrémités portent des barres verticales $dddd$, qui descendent latéralement des deux côtés du cylindre. A leur extrémité inférieure, les deux barres du même côté sont réunies par une traverse horizontale d', d' (*fig.* 95), de sorte qu'il y a une de ces traverses de chaque côté du cylindre. Sur la face tournée vers le cylindre, chaque traverse d' porte un talon t (*fig.* 96), qui glisse dans une rainure ou coulisse verticale formée le long du cylindre; de sorte que, pendant les mouvemens ascendans et descendans du piston, ce talon suit la rainure qui lui sert de guide, et par conséquent les barres d, d, et par suite la tige du piston, se trouvent exactement maintenues dans la direction verticale qui leur convient. Au milieu de chacune des deux traverses d', d', s'articule une bielle latérale e, e; et ces deux bielles elles-mêmes, réunies par une traverse horizontale e', se terminent par une bielle unique E, qui met en mouvement la mani-

velle g, et fait tourner l'arbre moteur G du bateau (*fig.* 95, 96 et 97). D'après cette première disposition de l'appareil, on voit comment l'arbre, et par suite les roues motrices du bateau, sont mis en mouvement par l'action du piston; et l'on voit aussi que si l'on avait attaché directement la bielle E au *sommet* de la tige du piston, au lieu de l'attacher à la traverse inférieure d', cette bielle aurait été trop courte, et par conséquent son action pour faire tourner la manivelle g aurait été trop saccadée et accompagnée d'un frottement trop grand.

Les ports d'admission de la vapeur dans le cylindre sont vus en 1 et 2. Le tiroir est représenté en HH; il se compose de la tige h', qui sert à le faire mouvoir, de la cavité h, qui exécute la distribution de la vapeur, et du tube creux ou demi-cylindre HH, dont la portion arrondie est pressée en h'', h'' par des étoupages qui forcent les rebords plats de la cavité h à rester hermétiquement en contact avec les deux ports du cylindre, ainsi que nous l'avons expliqué avec plus de détail, en décrivant le *tiroir long*, dans le chap. III.

La boîte à tiroir F est continuellement en communication avec le condenseur I, par l'intérieur du tube HH, qui est ouvert à ses deux bouts; et, par conséquent, cette boîte ne contient jamais que de la vapeur partiellement condensée. La vapeur de la chaudière arrive sous la cavité h et se distribue en-dessus ou en-dessous du piston, selon la position du tiroir. Quand celui-ci occupe la position marquée sur la *fig.* 94, la vapeur de la chaudière entre dans le cylindre par le port inférieur 2 et fait exécuter au piston à vapeur une course montante, tandis que la vapeur inutile sort de dessus le piston par le port 1, suit le tube HH et se rend au condenseur; l'inverse a lieu quand, au contraire, le tiroir est au sommet de sa course.

Le mouvement alternatif du tiroir sur les deux ports du cylindre est exécuté par un excentrique monté sur l'arbre de la machine. Cet excentrique est vu en K sur les *fig.* 94 et 95. Sa tige k, qui est munie d'une encoche de la forme ordinaire, s'embraye sur un levier k', qui met en mouvement l'axe o, et celui-ci, au moyen du bras de levier o' et de la petite bielle o'', soulève et baisse alternativement la tige du tiroir. Cette tige porte d'ailleurs à son sommet une traverse horizontale h''', qui glisse entre des guides parallèles qu'on voit en u, u, sur la *fig*, 94, et qui servent à assurer son mouvement dans la direction verticale. La portion de roue dentée qui est représentée en t' sert à mouvoir les tiroirs indépendamment de l'excentrique et à l'origine du travail. Pour cela on désembraye d'abord la tige de l'excentrique, au moyen du petit mécanisme représenté sur la *fig.* 95, à l'extrémité de la tige de l'excentrique. En reculant la clavette qui retient l'axe et rabattant le petit levier k'', l'axe o''' sort de l'encoche et reste libre dans la boucle z, de sorte que le mouvement du tiroir et celui de l'excentrique deviennent indépendans l'un de l'autre. Alors, en manœuvrant à la main, la roue T, on fait mouvoir le pignon t, et par suite le secteur t' qui au moyen du levier o', soulève ou baisse le tiroir. Les deux barres fixes T', T' servent à porter le pignon de la roue T.

Le condenseur est représenté en I, la pompe d'air en L, et le réservoir d'eau chaude en M. L'eau condensée au sortir du cylindre à vapeur s'amasse au fond du condenseur, où elle presse contre le clapet de pied *i*. Dans le moment où le piston *l* de la pompe d'air se soulève par l'action de la machine, comme nous le dirons dans un instant, le vide s'opère sous ce piston, et, par conséquent, le clapet *i* s'ouvre pour laisser sortir du condenseur l'eau qui s'y est formée, ainsi que l'air qui s'est dégagé de l'eau pendant son ébullition dans la chaudière. Ensuite, quand le piston de la pompe d'air redescend, l'air se comprime en-dessous, et le clapet *i* se referme; mais les clapets l', l' du piston de la pompe d'air se soulèvent au contraire et laissent passer, du dessous au dessus du piston, les produits amenés auparavant du condenseur. Enfin, quand le piston de la pompe d'air remonte de nouveau, les clapets l', l' se referment, et l'eau et l'air, amenés alors au-dessus du piston, soulèvent les clapets *m*, *m*, et passent dans le réservoir d'eau chaude M. Il est nécessaire de faire observer que tous les clapets dont il vient d'être question, s'ouvrant seulement dans un sens, ne permettent jamais à l'eau amenée par la soupape de rentrer dans les vases d'où elle est une fois sortie. Pour que la pompe d'air exécute convenablement son action, elle est fermée à sa partie supérieure par un couvercle garni d'une boite à étoupes, que traverse la tige l''.

Des deux côtés de la pompe d'air sont les deux pompes d'eau chaude *n*, *n* (*fig.* 95 et 96). Les tiges de ces deux pompes sont placées sur l'alignement de la tige de la pompe d'air, de sorte que toutes les trois sont mises en jeu en même temps et par une traverse commune N. Cette traverse porte à chaque bout une petite bielle *p*, qui s'articule sur un balancier PP, dont l'extrémité opposée est mise en mouvement par une autre bielle p' attachée à la traverse inférieure d', dont on a déjà parlé. D'après cette disposition, à mesure que le piston à vapeur de la machine monte ou descend, la traverse N exécute des mouvemens inverses, et ainsi le piston de la pompe d'air et les plongeurs n', n' de chacune des deux pompes d'eau chaude descendent ou montent alternativement dans leurs corps de pompe. Pour que le jeu de ces trois pompes s'exécute exactement dans le sens vertical, le plongeur de chacune des pompes d'eau chaude porte une queue *q*, *q*, qui glisse dans une douille pratiquée à l'extrémité des bras Q, Q (*fig.* 94, 95 et 96), L'action des pompes d'eau chaude est d'ailleurs semblable à celle des pompes du même genre, que nous avons décrites dans le chap. III, § II; c'est-à-dire que l'eau contenue dans le réservoir d'eau chaude M (*fig.* 95) passe dans le tuyau *x* et de là dans le corps de pompe *n* pendant la montée du plongeur; puis, quand celui-ci redescend, cette eau, qui ne peut plus rentrer dans le réservoir d'eau chaude, parce que la soupape de sortie se trouve alors fermée, est refoulée dans le tuyau *y*, dont elle soulève la soupape pour se rendre dans la chaudière, comme il est représenté sur la *fig.* 35, *pl. V*. Dans quelques machines du même modèle, les coulisses latérales

du cylindre, qui servent à guider le mouvement du piston, sont remplacées avec avantage par un parallélogramme ordinaire, dont une des tiges met en jeu les pompes d'air et d'eau chaude.

On voit, sur les *fig.* 96 et 97, que le bateau porte deux machines semblables à celle que nous venons de décrire, et que, pour assurer la régularité du mouvement pendant leur action simultanée, les manivelles qu'elles font mouvoir sont à angle droit l'une sur l'autre. Ces machines sont d'ailleurs sans gouverneur à force centrifuge. On voit aussi, sur ces figures, la position respective des excentriques qui servent à manœuvrer les tiroirs.

La machine que nous venons de décrire est sans balancier, ou du genre de celles qu'on a nommées récemment machines à *transmission directe*, parce que l'action du piston se transmet directement à la manivelle de l'arbre, sans l'intermédiaire d'un balancier. On construit beaucoup de machines de navigation où l'on emploie deux balanciers, en les plaçant de chaque côté de la machine et vers le bas du cylindre, au lieu de les placer au-dessus, ce qui permet de donner à la bielle de la manivelle une grande longueur, sans élever le centre de l'arbre au-dessus du pont du navire; mais, comme c'est une condition essentielle pour les machines destinées à la navigation, d'avoir très-peu de poids et surtout d'occuper le moins d'espace possible, on a dès longtemps cherché à les simplifier en y supprimant les balanciers. Dans les premières machines construites sur ce principe, la bielle de la manivelle était attachée au *sommet* de la tige du piston. Il en résultait que cette bielle, n'ayant pas assez de longueur, agissait sur la manivelle sous un angle trop aigu, ce qui fatiguait la machine, augmentait son frottement et forçait, pour diminuer ce défaut, d'adopter une course du piston très-courte. Il fallut donc recourir à quelque autre combinaison. L'une des dispositions adoptées consiste à donner à la machine deux cylindres et à attacher la bielle à une traverse inférieure mue horizontalement par les deux pistons. Cependant, comme l'emploi de deux cylindres a l'inconvénient de créer un surplus de frottement et surtout d'augmenter la consommation de combustible, en augmentant les surfaces exposées au refroidissement et les espaces inutilement remplis de vapeur à chaque course du piston, d'autres constructeurs ont eu l'idée de conserver un seul cylindre, mais d'attacher la bielle à une traverse placée *en contre-bas* du cylindre. La machine que nous venons de décrire est de ce dernier genre, mais elle a de plus l'avantage de faire agir la tige du piston sur la traverse inférieure, par le moyen d'une traverse en croix, ce qui permet de diminuer encore l'espace occupé en largeur par la machine, et détruit la tendance à la torsion qui se produit quand il n'y a qu'une traverse simple à la tige du piston. Par ce moyen, la machine conserve le peu de volume d'une machine sans balanciers, tout en jouissant de l'avantage d'une longueur de bielle et d'une longueur de course aussi considérables que dans les machines les plus avantageuses sous ce rapport; et l'économie d'espace obtenu par cette disposition, comparé à celui occupé par une machine de même force et à balanciers, est d'environ un tiers.

ARTICLE II.

FORMULES PRATIQUES POUR LE CALCUL DES MACHINES DE WATT A DOUBLE ACTION, ET EXEMPLE DE LEUR APPLICATION.

§ I. *Développement et application des formules exposées.*

D'après ce que nous venons de dire, les machines de Watt à double action sont sans détente ; ainsi, les formules qui leur conviennent sont les mêmes que celles des machines stationnaires à haute pression, dont nous nous sommes occupés dans le chap. IV. Seulement la quantité P, qui exprime la pression dans la chaudière, représentera une pression beaucoup moindre, et la quantité p, au lieu d'exprimer la pression atmosphérique, représentera maintenant la pression qui subsiste dans le cylindre, après condensation imparfaite de la vapeur.

Nous ne répéterons donc pas ici ces formules sous leur forme algébrique, mais nous les transformerons dans les formules numériques qui leur correspondent ; et pour cela nous rechercherons d'abord la valeur des constantes qui y figurent, afin d'en faire la substitution.

La quantité p représente la pression de condensation sous le piston ; mais il est nécessaire de faire ici une observation relative à cette pression. Dans les bonnes machines, bien pourvues d'eau de condensation, à un degré de température qui ne dépasse pas 50 degrés Fahrenheit ou 15 degrés centigrades, la pression dans le condenseur, prise au moyen du manomètre, est réduite ordinairement à 1.5 lb par pouce carré ; mais, il est clair que ce n'est pas là la vraie valeur de p, ou la pression de condensation dans le cylindre à vapeur lui-même et sous le piston. En effet, la condensation de la vapeur n'ayant lieu qu'à mesure que celle-ci passe du cylindre au condenseur, et la vitesse de ce mouvement ne dépendant que de la différence de pression entre la vapeur non condensée qui reste dans le cylindre et le vide imparfait du condenseur, il s'en suit que ce n'est que *graduellement* qu'il peut s'établir un équilibre de pression entre le cylindre et le condenseur. Donc, la moyenne pression de condensation sous le piston, durant la course, doit être supérieure à celle du condenseur. Des expériences directes à ce sujet, faites avec *l'indicateur* de Watt, prouvent que, dans les vitesses ordinaires et avec les dimensions des passages adoptées, la pression moyenne sous le piston est ordinairement de 2.5 lbs par pouce carré plus élevée que celle du condenseur. Cette dernière étant donc de 1.5 lb, on voit que la valeur de p sera généralement

$$p = 4 \times 144 \text{ lbs};$$

mais, du reste, on devra la mesurer chaque fois.

Quant au frottement de ces machines, on a acquis dans la pratique quelques

idées assez précises à ce sujet. C'est une donnée admise parmi les praticiens, et fondée sur un grand nombre d'essais faits sur les machines de Watt, que leur frottement, quand elles travaillent sous une charge modérée, varie de 2.5 lbs par pouce carré du piston, pour les machines les plus petites et les moins soignées, à 1.5 lb pour les plus grandes et les mieux faites; ce qui comprend le frottement des diverses parties frottantes, et la force nécessaire pour mouvoir les pompes de service de la machine, c'est-à-dire les pompes d'air, d'eau froide et d'eau chaude.

On entend par charge modérée, dans ces machines, une charge d'environ 8 livres par pouce carré du piston; et, d'après nos expériences sur les locomotives, on a lieu de penser que le frottement *additionnel* créé dans la machine, en raison de cette charge, est d'environ $\frac{1}{7}$ de la charge, ou 1 livre par pouce carré. En déduisant donc ce nombre, on voit que la donnée ci-dessus revient à établir que les machines de Watt, quand elles marchent sans charge, ont un frottement de 1.5 lb à 0.5 lb, par pouce carré, selon leurs dimensions; savoir : 1.5 lb pour les plus petites, ou celles qui ont un cylindre de 17.5 pouces de diamètre, et 0.5 lb pour celles dont le cylindre a 48.5 pouces de diamètre. Comme ces nombres sont à très-peu près en raison inverse des diamètres du cylindre, on voit que, pour évaluer le frottement de toute autre machine de même système et de dimensions intermédiaires, il faut faire varier les valeurs précédentes dans la proportion inverse du diamètre du cylindre. On en conclut d'abord que, pour une machine de grandeur moyenne entre les deux extrêmes cités, c'est-à-dire à cylindre de 33 pouces ou 2.75 pieds de diamètre, le frottement doit être compté à 0.75 livre par pouce carré de la surface du piston. Ensuite cette donnée unique peut, pour plus de simplicité, être substituée aux deux précédentes; et l'on en conclura le frottement d'une machine de Watt de dimensions quelconques, en multipliant le nombre 0.75 par le rapport inverse du diamètre du cylindre, dans la machine dont il est question, au nombre 33 ou au nombre 2.75, selon que les diamètres seront exprimés en pouces ou en pieds. En d'autres termes, si l'on suppose les dimensions exprimées en pieds, et le frottement rapporté de même au pied carré de la surface du piston, on voit qu'en représentant par d le diamètre du cylindre dans la machine dont on veut connaître le frottement, celui-ci aura pour valeur

$$f = 0.75 \times 144 \frac{2.75}{d} = \frac{300}{d}.$$

Cette évaluation est celle dont nous ferons usage, non-seulement pour les machines de Watt, dont elle a été déduite, mais encore pour toutes les machines sur lesquelles on ne possède point encore de données spéciales. Il est entendu toutefois que, pour ces dernières machines, elle ne peut être considérée que comme une valeur approximative et provisoire.

A l'égard du frottement additionnel de la machine, par unité de la charge r

supportée par le piston, c'est-à-dire à l'égard de la quantité δ, nous venons de supposer que sa valeur est la même que dans les locomotives; mais, à défaut d'expériences directes, on trouvera cette supposition confirmée par les remarques suivantes. Il est naturel de penser que la quantité δ doit, dans les diverses espèces de machines, suivre les mêmes variations que la quantité f ou le frottement sans charge, puisque toutes deux dépendent également du plus ou moins de complication du mécanisme et du mode de construction en usage dans chaque sorte de machine. Or, nous avons vu que, dans les locomotives, le frottement additionnel s'élève à 0.14 de la résistance imposée au piston; et que, dans les mêmes machines, le frottement sans charge, pris indépendamment de la résistance comme voiture, s'élève à 1.52 livre par pouce carré de la surface du piston, pour une machine à deux cylindres de 11 pouces de diamètre, qui équivalent à un seul cylindre de 15.55 pouces de diamètre. D'autre part, d'après la règle qui précède, on trouve que, dans une machine de Watt de cette dimension, le frottement sans charge serait de 1.60 livre par pouce carré; mais, en déduisant la résistance produite par la pompe d'air et la pompe d'eau froide, qui n'existent pas dans les locomotives, on retomberait à très-peu près sur le nombre 1.52 livre par pouce carré. On peut donc considérer que les deux espèces de machines ne diffèrent pas assez sensiblement l'une de l'autre, sous le rapport des frottemens, pour supposer qu'il y ait une grande différence entre les valeurs de δ convenables à l'une et à l'autre. Par conséquent, jusqu'à détermination spéciale, nous prendrons, dans les machines de Watt, la quantité δ à la même valeur que les locomotives; c'est-à-dire que nous ferons

$$\delta = 0.14.$$

En outre, la machine étant à condensation, on a

$$m = 4{,}100{,}000,$$
$$n = 250.$$

Enfin, dans ces machines, on fait ordinairement la liberté du cylindre égale à $\frac{1}{20}$ de la course, ce qui donne

$$c = 0.05\, l.$$

En substituant celles de ces valeurs qui sont constantes, dans les formules algébriques, on trouve les formules numériques suivantes:

Formules pratiques pour les machines de Watt à double action
(mesures anglaises).

CAS GÉNÉRAL.

$$v = \frac{S}{a} \cdot \frac{3{,}904{,}700}{250 + (1+\delta)\, r + p + f} \quad \ldots\ldots \text{ Vitesse du piston, en pieds, par minute.}$$

$$ar = 3{,}904{,}700\, \frac{S}{(1+\delta)v} - \frac{a}{1+\delta}(250 + p + f). \quad \text{Charge utile du piston, en livres.}$$

$S = av \frac{250 + (1+\delta)r + p + f}{3,904,700}$ . . . . . Vaporisation effective, en pieds cubes d'eau, par minute.

E. u. $= arv$. . . . . Effet utile, en livres élevées à 1 pied, par minute.

E. u. ch. $= \frac{arv}{33000}$. . . . . Effet utile, en chevaux.

E. u. 1 lb. co. $= \frac{arv}{N}$. . . . . Effet utile de 1 livre de combustible, en livres élevées à 1 pied.

E. u. 1 p. e. $= \frac{arv}{S}$. . . . . Effet utile de 1 pied cube d'eau, en livres élevées à 1 pied.

Q. co. pr. 1 ch. $= \frac{33000\ N}{arv}$. . . . . Quantité de combustible, en livres, qui produit l'effet d'un cheval.

Q. e. pr. 1 ch. $= \frac{33000\ S}{arv}$. . . . . Quantité d'eau, en pieds cubes, qui produit l'effet d'un cheval.

E.u.ch.pr. 1 lb.co. $= \frac{arv}{33000\ N}$. . . . . Effet utile, en chevaux, produit par livre de combústible.

E.u.ch. pr. 1 p.e. $= \frac{arv}{33000\ S}$. . . . . Effet utile, en chevaux, produit par pied cube d'eau vaporisée.

CAS DU MAXIMUM D'EFFET UTILE.

$v' = \frac{S}{a} \cdot \frac{3,904,700}{250 + P}$. . . . . Vitesse du piston, en pieds, par minute.

$ar' = \frac{a}{1+\delta}(P - p - f)$. . . . . Charge utile du piston, en livres.

$S = av' \frac{250 + P}{3,904,700}$. . . . . Vaporisation effective, en pieds cubes d'eau, par minute.

E. u. max. $= ar'v'$. . . . . Effet utile maximum, en livres élevées à 1 pied, par minute.

Pour montrer une application de ces formules, nous allons soumettre au calcul une machine construite par Watt aux moulins appelés *Albion-mills*, à Londres, et mise en expérience peu après sa construction par Watt lui-même. Cette machine avait les dimensions suivantes:

Diamètre du cylindre, 34 pouces; ou $a = 6.287$ pieds carrés.
Course du piston, 8 pieds; ou $l = 8$ pieds.
Liberté du cylindre, $\frac{1}{20}$ de la course; ou $c = 0,05\ l$.
Pression *absolue* dans la chaudière, 16.5 livres par pouce carré ou $P = 16.5 \times 144$ lbs par pied carré.
Vaporisation brute, 0.927 pied cube d'eau par minute; ce qui, en retranchant l'eau entraînée avec la vapeur à l'état liquide, et évaluée à 0.05 de la dépense totale, donne une vaporisation *effective* $S = 0.881$.
Consommation de houille dans le même temps, 6,71 lbs de houille; ou $N = 6.71$ lbs.

La machine avait été construite pour travailler à la vitesse de 256 pieds par minute, qui était considérée comme sa vitesse normale; mais, lorsqu'elle fut mise en expérience par Watt, accompagné de Sir J. Rennie, elle prit, en faisant son ouvrage régulier, la vitesse de 286 pieds par minute pour le piston, en consommant par minute la quantité d'eau et de charbon que nous venons de rapporter (Voyez Farey, *On the Steam-engine*, p. 515 et suiv.).

Si l'on cherche les effets que devait produire cette machine à sa vitesse de maximum d'effet, puis à celles de 256 et 286 pieds par minute, on trouve les résultats suivans :

			Maximum d'effet utile.
v	= 286	... 256	... 208
ar	= 5396	... 6632	... 9135
$\frac{r}{144}$	= 5.96	... 7.33	... 10.09
S	= 0.881	... 0.881	... 0.881
E. u.	= 1,543,300	... 1,697,800	... 1,889,600
E. u. ch.	= 47	... 51	... 58
E. u. 1 lb. co.	= 230,000	... 253,000	... 283,100
E. u. 1 p. e.	= 1,751,700	... 1,927,100	... 2,156,200
Q. co. pr. 1 ch.	= 0.144	... 0.130	... 0.117
Q. e. pr. 1 ch.	= 0.020	... 0.018	... 0.016
E. u. ch. pr. 1 lb. co.	= 6.97	... 7.67	... 8.58
E. u. ch. pr. 1 p. e.	= 50	... 56	... 62

On voit que, selon la charge ou la vitesse du piston, cette machine pouvait produire des effets variant de 47 à 58 chevaux.

Relativement aux formules données plus haut, il doit être entendu que les effets qu'elles indiquent pour les machines, ne se produiront qu'autant que les conditions supposées dans le calcul se trouveront remplies. Mais, comme il est fréquent de voir varier plusieurs circonstances importantes, auxquelles on néglige souvent de faire attention, nous devons ajouter ici : 1°. que tout l'effet produit dépendant directement et absolument de la vaporisation effectuée, il est tout-à-fait impossible de connaître la force ou d'évaluer les effets d'une machine donnée, sans avoir mesuré ou estimé d'abord sa vaporisation ; 2°. que la pression dans la chaudière doit être, pour chaque cas, observée au manomètre, ainsi que celle du condenseur, parce qu'un changement dans la pression de la chaudière est une circonstance qui se présente continuellement, et qu'il est clair que, si la machine travaille à une plus forte pression, certains effets produits changeront en conséquence; 3°. à l'égard surtout des effets dus à la combustion d'un poids donné de combustible, nous dirons que rien n'est plus incertain. Les expériences de Smeaton ont démontré que les diverses qualités de houille en usage, en Angleterre, peuvent produire des effets variant dans diverses proportions, entre les nombres 86 et 133. En outre, il a trouvé que la houille à

l'état de déchet, comme on l'emploie dans quelques mines, comparée à la houille de même qualité, en morceaux de la grosseur d'un œuf, produit des effets dans la proportion de 80 à 100 ; et, enfin, que si le feu est mal conduit, chargé en couches trop épaisses et remué rarement, les effets pourront n'être que les $\frac{5}{6}$ de ce qu'ils seraient avec un feu clair et bien mené. Ainsi, on voit que toutes ces causes ensemble peuvent produire, des moins favorables aux plus avantageuses circonstances, une différence d'effet dans les proportions de

$$\frac{86}{133} \times \frac{80}{100} \times \frac{5}{6} = \frac{43}{100};$$

c'est-à-dire qu'il peut y avoir de l'un à l'autre une différence de plus de moitié.

D'ailleurs, il est clair encore que l'effet dû à un poids donné de combustible dépendra également de la construction plus ou moins judicieuse du foyer et de la chaudière, ainsi que des encroûtemens qui pourront s'y être produits pendant le travail. Il est donc impossible, par ces diverses raisons, de baser une comparaison mathématique de l'effet des machines, sur la quantité de combustible qu'on rapporte avoir été consommée par elles pour produire un effet donné.

Par exemple, dans l'expérience de Watt, que nous venons de mentionner et qui avait été très-favorable, la consommation de combustible avait été à raison de 7.24 lbs. de houille par pied cube d'eau vaporisée ; tandis que, d'après les observations moyennes de Watt lui-même, cette vaporisation ne se produit pas en général dans ses chaudières, à moins d'une consommation de 8.4 lbs. de houille de première qualité. Si donc, dans l'exemple dont il s'agit, les données ordinaires n'avaient pas été dépassées, la vaporisation de 0.927 pied cube d'eau par minute aurait exigé une consommation de 7.79 lbs. de houille ; et, ainsi, l'effet obtenu par livre de combustible n'aurait plus été, dans le cas du maximum d'effet, que

$$\text{E. u. 1 lb. co.} = \frac{\text{E. u. max.}}{7.79} = \frac{1,899,000}{7.79} = 243,850 \text{ lbs};$$

résultat qui, comme on voit, est très-inférieur à celui que l'on déduit de l'expérience elle-même.

Pour exprimer en mesures françaises les formules numériques données plus haut, il faut employer, pour les constantes, les valeurs suivantes :

Frottement de la machine non chargée, 0.0527 kilogramme par centimètre carré de la surface du piston, pour une machine à cylindre de 84 centimètres de diamètre ; ce qui donne, en général, en représentant par f le frottement exprimé en kilogrammes, par mètre carré, et par d le diamètre du cylindre mesuré en mètres,

$$f = 527 \times \frac{0.84}{d} = \frac{450}{d}.$$

Frottement additionnel de la machine, par unité de la résistance sur le piston, $\frac{1}{7}$ de cette résistance ; ou $\delta = 0.14$.

Pression de condensation dans le cylindre à vapeur, 0.281 kilogramme par centimètre carré ; ou $p = 2810$ kilogrammes par mètre carré.

Liberté du cylindre, $\frac{1}{20}$ de la course ; ou $c = 0.05\, l$.

Constantes du volume spécifique de la vapeur,

$$m = 20{,}000{,}000.$$
$$n = 1200.$$

En fesant donc les substitutions convenables, les équations numériques propres au calcul de ces machines deviennent :

Formules pratiques pour les machines de Watt à double action
(mesures françaises).

CAS GÉNÉRAL.

$$v = \frac{S}{a} \cdot \frac{19{,}048{,}000}{1200 + (1+\delta)\,r + p + f} \ldots$$
Vitesse du piston, en mètres, par minute.

$$ar = 19{,}048{,}000 \frac{S}{(1+\delta)v} - \frac{a}{1+\delta}.(1200 + p + f)$$
Charge utile du piston, en kilogrammes.

$$S = av \frac{1200 + (1+\delta)\,r + p + f}{19{,}048{,}000} \ldots$$
Vaporisation effective, en mètres cubes d'eau, par minute.

$$\text{E. u.} = arv \ldots$$
Effet utile, en kilogrammes élevés à 1 mètre, par minute.

$$\text{E. u. ch.} = \frac{arv}{4500} \ldots$$
Effet utile, en chevaux.

$$\text{E. u. 1 k. co.} = \frac{arv}{N} \ldots$$
Effet utile de 1 kilogramme de combustible, en kil. élevés à 1 mètre.

$$\text{E. u. 1 m. e.} = \frac{arv}{S} \ldots$$
Effet utile de 1 mètre cube d'eau, en kilogr. élevés à 1 mètre.

$$\text{Q. co. pr. 1 ch.} = \frac{4500\,N}{arv} \ldots$$
Quantité de combustible, en kilog., qui produit l'effet d'un cheval.

$$\text{Q. e. pr. 1 ch.} = \frac{4500\,S}{arv} \ldots$$
Quantité d'eau, en mètres cubes, qui produit l'effet d'un cheval.

$$\text{E. u. ch. pr. 1 k. co.} = \frac{arv}{4500\,N} \ldots$$
Effet utile, en chevaux, produit par kilogramme de combustible.

$$\text{E. u. ch. pr. 1 m. e} = \frac{arv}{4500\,S} \ldots$$
Effet utile, en chevaux, produit par mètre cube d'eau vaporisée.

CAS DU MAXIMUM D'EFFET UTILE.

$$v' = \frac{S}{a} \cdot \frac{19{,}048{,}000}{1200 + P} \ldots$$
Vitesse du piston, en mètres, par minute.

$ar' = \frac{a}{1+\delta}(P - p - f)$. . . . . Charge utile du piston, en kilogrammes.

$S = av' \frac{1200 + P}{19,048,000}$. . . . . Vaporisation effective, en mètres cubes d'eau, par minute.

E. u. max. $= ar'v'$. . . . . Effet utile maximum, en kilogrammes élevés à 1 mètre par minute.

Si l'on applique ces formules au calcul de la même machine, dont nous avons donné plus haut les dimensions, on aura d'abord :

Diamètre du cylindre, 86.359 centimètres ; ou $a = 0.584$ mètre carré.
Course du piston, $l = 2.438$ mètres.
Liberté du cylindre, $\frac{1}{20}$ de la course ; ou $c = 0.05\,l$.
Pression de la chaudière, 1.160 kilogramme par centimètre carré ; ou P=11600 kilogr. par mètre carré.
Vaporisation brute, 0.02634 mètre cube d'eau par minute ; ou vaporisation effective, S = 0.02502 mètre cube par minute.
Consommation de houille dans le même temps, N = 3.042 kilogrammes.

Et, en introduisant ces données dans les formules, on trouvera pour les effets de la machine, aux différentes vitesses indiquées :

			Maximum d'effet utile.
v.	= 87	... 78	... 64
ar	= 2472	... 3034	... 4144
$\frac{r}{10,000}$	= 0.423	... 1.320	... 0.710
S.	= 0.02502	... 0.02502	... 0.02502
E. u.	= 215,490	... 236,740	... 264,250
E. u. ch.	= 48	... 53	... 59
E. u. 1 k. co.	= 70,840	... 77,820	... 86,870
E. u. 1 m. e.	= 8,611,600	... 9,461,000	... 1,056,050
Q. co. pr. 1 ch. . .	= 0.064	... 0.058	... 0.052
Q. e. pr. 1 ch. . . .	= 0.00052	... 0.00048	... 0.00043
E. u. ch. pr. 1 k. co.	= 15.74	... 17.29	... 19.30
E. u. ch. pr. 1 m. e.	= 1914	... 2102	... 2347

§. II. *Considérations sur l'application du mode ordinaire de calcul aux machines de Watt.*

Comme les machines de Watt sont celles qui sont le plus connues et auxquelles on applique les calculs ordinaires avec le plus de confiance, nous nous arrèterons un moment ici, pour ajouter quelques nouvelles réflexions à celles que nous avons déjà présentées à ce sujet, et pour comparer le calcul ordinaire avec le nôtre, relativement à ces machines.

Quelques ingénieurs pensent que les machines de Watt, n'ayant jamais qu'une vitesse fort modérée, et ayant en outre des passages très-larges pour la circulation de la vapeur, doivent nécessairement travailler toujours à pleine pression dans le cylindre. D'ailleurs, il leur paraît encore que si, par exemple, la capacité de la chaudière a été calculée pour produire par minute 30 fois le cylindre plein de vapeur à la pression de la chaudière, il s'ensuit nécessairement que chaque fois que la machine ne donnera que 30 coups de piston par minute, ce qui, pour une course de 8 pieds, revient à une vitesse de 240 pieds par minute, la vapeur ne peut manquer d'avoir, dans le cylindre, la même pression que dans la chaudière. Par conséquent, ils en concluent que, quelque vraie que soit la théorie que nous avons exposée, elle n'est cependant pas nécessaire pour calculer les effets de ces machines, puisque les suppositions du calcul ordinaire s'y trouvent vérifiées, et qu'ainsi les deux méthodes doivent conduire au même résultat. Nous donnerons un moment d'attention à ces argumens.

Relativement à l'air des passages et à la vitesse du piston, comme les machines de Watt ont, pour la circulation de la vapeur, des passages d'une aire égale à $\frac{1}{25}$ de l'aire du cylindre, et des vitesses du piston comprises entre 200 et 300 pieds anglais par minute, on peut voir, en recourant à ce que nous avons dit chap. I, § IV, que ces machines n'ont, à cet égard, aucun avantage sur les locomotives, dans lesquelles nous avons démontré de très-grandes différences de pression entre la chaudière et le cylindre. Nous n'y reviendrons donc pas en ce moment.

Quant à la dimension calculée de la chaudière, il est facile de reconnaître que la conclusion qu'on veut en tirer n'est pas exacte. En effet, supposons que la chaudière soit capable de fournir par minute 30 cylindres pleins de vapeur, à la pression de la chaudière ou à la pression de 16 livres par pouce carré, et qu'on mette la machine en mouvement avec une charge totale et frottemens compris, qui, au lieu de s'élever à 16 livres, ne soit que de 8 livres par pouce carré, ce qu'on ignore la plupart du temps, il est clair que, puisque la machine se mettra au mouvement uniforme avec cette charge, il faudra bien que la vapeur ne prenne dans le cylindre qu'une pression de 8 livres par pouce carré. Qu'arrivera-t-il donc alors? Il arrivera que le machiniste, sachant que 30 tours par minute est la vitesse régulière de sa machine, ne voudra pas lui laisser prendre une vitesse plus grande. En outre, il sait aussi que la pression dans la chaudière doit être de 16 livres par pouce carré. Ainsi, il accomplira soigneusement ces deux conditions; c'est-à-dire qu'il règlera l'ouverture de la soupape à gorge, et poussera le feu seulement de manière à avoir la vitesse voulue, et pas plus. Mais il est évident que, dans ces circonstances, la machine marchera à vaporisation réduite; car, puisque la chaudière est capable de fournir par minute 30 cylindres de vapeur, à la pression de 16 livres par pouce carré, il s'ensuit, vu la différence des volumes de la vapeur, qu'elle en pourrait fournir environ 60 à la pression de 8 livres. Or, elle n'en fournit que 30; donc la vaporisation réelle

n'est que moitié de ce qu'elle pourrait être, et l'on ne peut en aucune manière s'appuyer sur ce que la chaudière produit toute la vapeur dont elle est capable, pour en en conclure que la pression dans le cylindre est égale à la pression dans la chaudière.

Du reste, il est bien facile de se convaincre que les machines de Watt, tout aussi bien que celles que nous avons traitées déjà, travaillent à des pressions souvent fort réduites dans le cylindre. En effet, on en peut trouver la preuve dans trois circonstances bien constatées : 1°. *L'indicateur* de Watt, appliqué au cylindre de plusieurs machines de ce système, dans l'instant qu'elles fonctionnaient à leur vitesse habituelle et dans leur état régulier, a fait reconnaître que la pression dans le cylindre était de plusieurs livres par pouce carré au-dessous de celle de la chaudière; donc, malgré les motifs allégués, il n'y a point égalité nécessaire entre les deux pressions. 2°. La pratique a démontré à Watt que, dans ses machines, chaque pouce cube d'eau vaporisé produit un pied cube de vapeur d'un degré d'élasticité suffisant pour effectuer le mouvement. C'est une donnée pratique qu'il a consignée dans ses Notes à l'article de l'*Encyclopédie* de Robison, sur la machine à vapeur (*The articles Steam and Steam-engines, by* John Robison, *with Notes and Additions, by* James Watt. *Edinburgh*, 1818, p. 145). D'après cette observation, la vapeur se dépense donc dans le cylindre sous un volume égal à 1728 fois celui de l'eau, puisqu'un pied cube contient 1728 pouces cubes. Mais, cette vapeur se forme dans la chaudière à la pression de 16.5 lbs par pouce carré, qui ne donne que 1530 fois le volume de l'eau. Donc, il faut qu'en passant dans le cylindre, le volume de la vapeur devienne 1728 au lieu de 1530; c'est-à-dire que la vapeur subisse une diminution de pression et en même temps une augmentation de volume considérable. 3°. Il est connu que les machines de Watt, mises en expérience, peuvent produire environ moitié en sus de leur force nominale, sans qu'il soit fait aucun changement à la machine, et sans augmenter sa vitesse. Donc, dans leur travail journalier, elles ne fonctionnent pas à pleine pression dans le cylindre, car, sans cela, il serait impossible de leur faire exécuter davantage.

Ainsi, l'on voit que ces machines travaillent habituellement à *pression réduite*, tout aussi bien que celles dont nous avons parlé précédemment. Du reste, nous ne donnons pas cette observation comme nouvelle en elle-même. Une diminution de pression dans le cylindre et même une augmentation de volume de la vapeur, avaient déjà été constatées dans ces machines; mais cette observation, au lieu de conduire à la théorie de la machine à vapeur telle que nous l'avons exposée, n'était qu'un fait matériel dont on se servait pour expliquer le *coefficient* que nous repoussons.

D'après ce qui précède, il est facile de se rendre compte de la nature de l'erreur que l'on commet en appliquant aux machines de Watt la méthode des coefficiens. En effet, puisqu'une différence de pression existe dans ces machines, entre la chaudière et le cylindre, et a été reconnue par l'expérience, supposons une machine dans laquelle la pression absolue dans la chaudière soit de 16 livres par pouce

carré, et la pression dans le cylindre de 12 livres par pouce carré. Nous n'adoptons ces nombres que pour fixer les idées, d'autres valeurs des pressions conduiraient aux mêmes conséquences. Supposons encore que la machine, étant en travail régulier, donne 30 coups de piston par minute. Pour calculer l'effet que doit produire cette machine, dans la méthode des coefficiens, on multipliera la vitesse du piston par la pression dans la chaudière et par la surface du piston, et l'on aura un certain nombre que l'on regardera comme l'effet *théorique* de la machine, c'est-à-dire son effet, y compris les frottemens et les pertes auxquelles on suppose la machine sujette; de sorte que le coefficient qu'on y appliquera ensuite, représentera la valeur de ces frottemens et de ces pertes.

Or, il est clair que c'est là une erreur, et que l'effet *théorique* ainsi calculé est, dans le cas dont il s'agit, de $\frac{1}{3}$ plus grand que l'effet réel que l'on peut attendre de la machine. En effet, nous avons supposé que la machine donne 30 coups de piston par minute, et que la pression dans le cylindre est de 12 livres par pouce carré. Donc la vapeur fournie par la chaudière, par minute, se monte à 30 cylindres, à la pression de 12 livres. Mais, nous avons vu aussi que, *dans la chaudière*, cette même vapeur est à la pression de 16 livres par pouce carré, au lieu de 12, et l'on sait que les volumes de la vapeur sont à-peu-près en raison inverse de la pression. Donc, pendant que cette vapeur était dans la chaudière, son volume total n'était que de 21 cylindres pleins. Donc, si l'on veut supposer que la vapeur agisse à cette pression, elle ne pourra remplir le cylindre que 21 fois au lieu de 30; et, par conséquent, si l'on calcule l'effet de la machine en prenant la vapeur à la pression de la chaudière, il faut aussi prendre le piston à la vitesse de 21 courses, qui lui correspond, et non à celle de 30, qui ne peut se réaliser dans la machine qu'autant que cette pression n'existe pas. En d'autres termes, pour avoir l'effet théorique réel de la machine, il faut: ou bien prendre la pression dans le cylindre et la multiplier par la vitesse correspondante et observée du piston, ou bien prendre la pression dans la chaudière, qui est plus grande dans le rapport de $\frac{4}{3}$, mais la multiplier par la vitesse correspondante que prendrait le piston, et qui est les $\frac{3}{4}$ de la précédente.

C'est donc dans le calcul *théorique* de l'effet de la machine que l'on commet une erreur; et l'on en commet une autre quand on attribue ensuite la différence observée entre ce faux calcul et l'effet pratique de la machine, à des *pertes de force vive*, à des *pertes de travail*, qui, en outre des frottemens, auraient lieu au passage de la vapeur par les orifices qu'elle traverse en se rendant au cylindre. En effet, puisque nous venons de voir que la pression de 12 livres par pouce carré dans le cylindre, multipliée par la vitesse du piston sous cette pression, donne le même résultat que la pression de 16 livres dans la chaudière, multipliée par la vitesse correspondante à cette pression, il s'ensuit que l'effet de la machine n'a subi aucune réduction après le passage des conduits.

Quant aux prétendues pertes de force vive dont il est question, elles ne peuvent exister; car l'étranglement des passages ayant pour seul résultat de créer une plus grande différence de pression entre le cylindre et la chaudière, c'est-à-dire de faire monter la pression dans la chaudière, de plus en plus au-dessus de celle du cylindre, qui est fixe, il s'ensuit que, dès que la vaporisation de la chaudière a pourvu à ce surplus de pression, ce qui exige, à l'origine du travail, l'emmagasinement inutile d'une certaine masse de vapeur, tout reste ensuite dans le même état, *le régime s'établit*, et il n'y a plus aucune perte de force vive. A partir de ce moment la vapeur s'écoule dans le cylindre en totalité, à mesure de sa production. Au moment de son entrée, elle se transforme nécessairement à la pression de la résistance, puisque, le mouvement étant uniforme, il faut bien que la puissance soit égale à la résistance. Mais, comme cet effet se produit par une dilatation de la vapeur, c'est-à-dire, par un abaissement de pression accompagné d'une augmentation de volume à-peu-près en raison inverse, et que cet accroissement de volume fournit à une vitesse du piston d'autant plus grande, il s'ensuit qu'il ne résulte de cette circonstance aucune perte sensible d'effet utile dans la machine.

Le procédé ordinaire consiste donc toujours à introduire une erreur préalable dans le calcul de l'effet utile, et c'est pour corriger cette erreur qu'on se trouve ensuite dans la nécessité d'employer un coefficient, qui fait supposer de si énormes pertes dans la machine. Quant à ce coefficient lui-même, ce serait à tort qu'on penserait que, malgré son inexactitude en principe, il pourrait néanmoins conduire d'une manière suffisamment exacte pour la pratique, à la détermination des effets utiles, et remplacer le calcul que nous introduisons à sa place. C'est ce que les résultats que nous avons obtenus plus haut permettent de vérifier facilement.

En effet, si l'on se reporte aux effets utiles que nous avons obtenus pour les vitesses respectives de 286, 256 et 208 pieds anglais par minute, et qu'on cherche à les représenter par un coefficient appliqué à ce qu'on appelle l'effet *théorique*, on trouvera les résultats suivans :

Vitesses.			Coefficiens.
286...	Effet théorique.	3,236,500	0.48
	— réel.	1,543,300	
256...	Effet théorique.	2,897,000	0.59
	— réel.	1,697,800	
208...	Effet théorique.	2,353,800	0.81
	— réel.	1,899,600	

Ainsi, pour ces machines aussi bien que pour celles traitées précédemment, un coefficient constant quelconque ne saurait tenir lieu du calcul analytique que nous introduisons à sa place. Et en observant la variation considérable éprouvée par le coefficient, pour la différence fort ordinaire qui existe entre les vitesses 286, 256 et 208 pieds par minute, pour lesquelles ce coefficient prend successivement les

trois valeurs données ci-dessus, on doit être bien convaincu de la déception du mode de calcul par coefficiens; car, pour peu que la vitesse de la machine à laquelle on applique le calcul, diffère de la vitesse à laquelle le coefficient a été originairement déterminé, ce qu'on ignore entièrement, on ne peut en aucune manière compter sur l'effet indiqué par ce coefficient.

On voit ainsi que les machines de Watt ne font nullement exception à la règle générale sous ce rapport; et l'on peut observer encore que l'expérience de Watt, rapportée plus haut, donnerait lieu, dans la théorie ordinaire, précisément aux mêmes contradictions et aux mêmes inexactitudes que les expériences que nous avons discutées dans le chap. Ier, sur les locomotives et les machines à haute pression.

En effet, dans cette expérience, la machine, en vaporisant 0.927 pied cube d'eau par minute, et en surmontant une résistance que les expérimentateurs évaluaient à 7 livres par pouce carré de la surface du piston, qui était de 6.287 pieds carrés, prit une vitesse de 286 pieds par minute.

Nous trouvons alors que, puisque la machine n'avait qu'un effet utile de

$$6.287 \times 7 \times 144 \times 286 = 1,812,470 \text{ livres élevées à 1 pied par minute},$$

et que sa force *théorique*, calculée suivant cette méthode, d'après l'aire du cylindre, la pression de la vapeur dans la chaudière diminuée de celle du condenseur, et la vitesse du piston, était

$$6.287 \times (16.5 - 4) \times 144 \times 286 = 3,236,530 \text{ livres élevées à 1 pied par minute},$$

il en résultait que, pour passer des effets théoriques aux effets pratiques, il fallait employer le coefficient 0.56. Par conséquent, en suivant les raisonnemens de cette théorie, et se rappelant qu'à la pression de 16.5 livres par pouce carré, le volume de la vapeur est de 1530 fois celui de l'eau qui l'a produite, on en devait tirer les conclusions suivantes :

1°. La vitesse observée ayant été de 286 pieds par minute, la vaporisation calculée sur la quantité d'eau qui, réduite en vapeur à la pression de la chaudière, pouvait occuper le volume décrit par le piston, et divisée ensuite, comme on le fait par le coefficient, pour tenir compte des pertes, aurait dû être

$$\frac{\frac{1}{1530} \times 6.287 \times 286}{0.56} = 2.099 \text{ pieds cubes d'eau par minute, tandis qu'elle a été de } 0.927.$$

2°. La machine n'ayant vaporisé que 0.927 pied cube d'eau par minute, la vitesse du piston calculée sur le volume de vapeur formée à la pression de la chaudière, et réduite ensuite par le coefficient, non pas comme cela a été fait, puisque ce problème n'était pas résolu, mais comme on doit naturellement le conclure de la signification attribuée à ce coefficient, ne pouvait être que

$$\frac{1530 \times 0.927}{6.287} \times 0.56 = 126 \text{ pieds par minute, tandis qu'elle a été de 286.}$$

3°. Le coefficient trouvé par la comparaison des effets théoriques aux effets pratiques étant de 0.56, les frottemens, pertes et résistances diverses de la machine devraient se monter à 0.44 de la puissance effective; tandis que ces frottemens, pertes et résistances, consistant uniquement dans le frottement de la machine et la liberté du cylindre, ne pouvaient être évaluées qu'au taux suivant :

Frottement total (celui additionnel compris), 2 lbs par pouce carré, ou en fraction de la pression effective, $\frac{1}{12}$.	0.17
Liberté du cylindre, $\frac{1}{20}$ de la course effective, ou.	0.05
	0.22

On voit par là que l'expérience de Watt, aussi bien que celles que nous avons examinées déjà, seraient tout-à-fait inexplicables dans cette théorie, et il en sera de même de toute expérience dans laquelle on notera la quantité d'eau vaporisée.

Avant de quitter cet exemple, nous devons rappeler que quelques auteurs emploient aussi des coefficiens *constans*, mais sans conserver le même pour déterminer la vaporisation que pour déterminer l'effet utile. Ce mode de calculer est provenu de ce que ces auteurs ont reconnu, par expérience, que la vapeur acquiert dans le cylindre une pression et une densité moindres que dans la chaudière. Mais, comme ils n'ont pu fixer à priori quelle était cette pression dans le cylindre, et qu'ils cherchent toujours à la déduire de celle de la chaudière, au lieu de la conclure directement et en principe, comme nous le fesons, de la résistance sur le piston, la diminution de pression observée ne pouvait être définie dans les limites, et elle restait simplement un fait pratique dont ils se prévalaient pour expliquer leur *coefficient*. Le changement de coefficient qu'ils emploient fait éviter la première et la deuxième des contradictions que nous venons de signaler; mais la troisième, ainsi que toutes les objections que nous avons développées dans le chap. Ier., contre l'emploi de tout coefficient constant, restent dans leur entier. C'est-à-dire que, dans cette méthode, on calcule toujours la force de la machine indépendamment de la vaporisation de la chaudière, et la vaporisation indépendamment de la résistance à mouvoir; qu'on trouve toujours l'effort dont est capable la machine, le même à toutes les vitesses, et que, par conséquent, l'effet utile de la machine augmente avec la vitesse de son mouvement, ce qui est contraire à l'observation; qu'on ne peut tenir aucun compte de l'ouverture du régulateur, à moins d'introduire pour cet objet une nouvelle série de coefficiens, ainsi que pour tous les changemens de vitesse. En un mot, c'est la méthode que nous avons appliquée, dans le chap. Ier., aux expériences de la machine à haute pression de Brighton, et, par conséquent, elle est directement soumise à toutes les objections que nous avons faites alors.

CHAPITRE VIII.

MACHINES DE CORNWALL A DOUBLE ACTION,

OU

MACHINES A DOUBLE ACTION, A HAUTE PRESSION, A DÉTENTE ET A CONDENSATION.

ARTICLE I.

DESCRIPTION DE LA MACHINE.

On emploie dans le comté de Cornwall, en Angleterre, des machines à double action et des machines à simple action. Les secondes sont une modification des machines de Watt à simple action, dont nous parlerons un peu plus loin. Nous ne nous occuperons ici que des premières.

Les machines de Cornwall à double action sont des machines *à double action*, *à haute pression, à détente et à condensation*. En d'autres termes, ce sont les machines à double action de Watt, employées avec une haute pression dans la chaudière, c'est-à-dire avec une pression absolue d'environ 3.5 atmosphères, et disposées pour y faire usage de la détente de la vapeur, force dont Watt n'a tiré parti que dans ses machines à simple action.

Les *fig*, 78, 79 et 80, *pl. XV*, représentent une machine de ce système, établie pour concasser le minerai au puits de Tincroft, dans la mine de Fowey-Consols, et construite par MM. Petherwick et West, deux des ingénieurs les plus célèbres du comté. La *fig*. 80 donne l'ensemble de la machine; les deux autres figures donnent, à une plus grande échelle, le détail de son encliquetage.

Le cylindre de la machine est représenté en C. Il est enveloppé d'une chemise ou second cylindre de métal c' séparé du premier par un petit intervalle, dans lequel la vapeur de la chaudière pénètre par le tuyau *i*. L'eau qui se forme par condensation dans cette enveloppe s'échappe ensuite par le tuyau c_{I}, qui la reconduit à la chaudière. c'' est le couvercle du cylindre, et c''' un faux couvercle. L'intervalle entre eux est rempli de cendres tamisées qui s'opposent à la perte du calorique par radiation. Le fond du cylindre est représenté en c_{II}. Il est creux, et quelquefois il

est disposé pour recevoir aussi la vapeur de la chaudière. Outre ces précautions, la chemise du cylindre, ainsi que le tube à vapeur et les boites à soupapes, sont renfermés dans une caisse extérieure ou enveloppe en bois, et l'intervalle est rempli de cendres. Le cylindre est donc parfaitement protégé contre tout refroidissement extérieur.

Le piston P est creux pour lui donner plus de légèreté, et il est garni de chanvre. Sa tige p est maintenue dans la direction verticale par un parallélogramme $p' \ p''$ $r' \ r''$, dont nous avons donné la description détaillée, chap. III, § V. Par la disposition de cet appareil, à mesure que l'angle p'' est dévié dans un sens par l'oscillation du balancier, l'angle r'' est ramené en sens contraire par la résistance de la bride Rr'', fixée au tenon R, et le point p' reste dans la verticale. Ce parallélogramme sert également, au moyen des barres de jonction t_1, t_{11}, à diriger la tige TT de la pompe d'air.

La vapeur arrive de la chaudière par le tube d'apport i, et, après avoir rempli la double enveloppe du cylindre, elle passe dans le tuyau S', qui la conduit à la colonne à vapeur S, en traversant d'abord la soupape régulatrice h. Celle-ci est une soupape conique ordinaire qui, selon qu'elle est plus ou moins séparée de son siége, livre un passage plus ou moins considérable à la vapeur. A cet effet, sa tige h' sort de la colonne à vapeur en traversant une boite à étoupes, et, au moyen de la poignée h'', on peut régler son ouverture au degré précis que l'on veut, comme nous l'avons expliqué en parlant de ces soupapes, chap. III, § VIII. Une fois admise dans la colonne S, la vapeur la remplit entièrement, ainsi que les passages qui en font la continuation, jusqu'à l'entrée des deux soupapes d'admission; et elle est prête à agir, soit sur une face du piston, soit sur l'autre, selon celle de ces deux soupapes qui se trouve ouverte.

Les deux soupapes, supérieure et inférieure, d'admission sont représentées en a et a' dans la *fig.* 79. Dans les autres figures, elles ne sont pas vues, parce qu'elles se trouvent cachées par les soupapes d'éduction qui sont en avant. Celles-ci sont figurées en b' et b. Les quatre soupapes sont d'ailleurs de la forme dite à *couronne* ou à *double siége*, que nous avons décrite, chap. III, § III. Nous venons de voir que les soupapes d'admission communiquent toutes deux, au moyen de la colonne à vapeur S, avec le tuyau d'apport de la vapeur. Les deux soupapes d'éduction communiquent de même, au moyen de la colonne d'éduction e (*fig.* 79), avec le tuyau d'éduction E, qui conduit au condenseur. En outre, entre les soupapes supérieures a et b', il y a un espace d, clos hermétiquement par les deux soupapes, et qui est l'entrée du port supérieur D du cylindre, comme on le voit sur la *fig.* 78. De même, entre les deux soupapes inférieures a', b, le passage d' conduit au port inférieur D' du cylindre. Ces deux passages d et d' sont toujours ouverts. Si donc on suppose la soupape a ouverte, et la soupape b' fermée, il est clair que la vapeur, arrivant de la chaudière par la colonne à vapeur S, traversera la soupape a, sui-

vra le passage *d*, et pénétrera dans la partie supérieure du cylindre; mais la clôture de la soupape *b'* l'empêchera de se répandre dans la colonne d'éduction. Si, au contraire, la soupape *a* se trouve fermée, et la soupape *b'* ouverte, il ne pourra passer aucune vapeur de la colonne S dans le haut du cylindre, puisque la soupape *a* est close; mais, s'il existe déjà de la vapeur dans le cylindre, celle-ci en sortira par le passage *d*, traversera la soupape *b'* et entrera dans la colonne d'éduction *e*, qui la conduira au tube E, et de là au condenseur. Des effets semblables se produiront relativement aux soupapes inférieures *a'* et *b*. Par conséquent, si l'on suppose que la soupape supérieure d'admission *a* et la soupape inférieure d'éduction *b* soient ouvertes en même temps, et les deux autres soupapes fermées, la vapeur pénètrera de la chaudière dans le cylindre, au-dessus du piston, tandis que la vapeur située au-dessous s'écoulera librement dans le condenseur, et, ainsi, lepiston exécutera sa course descendante. Si, ensuite, c'est au contraire la soupape inférieure d'admission *a'* et la soupape supérieure d'éduction *b'* qui sont ouvertes, la vapeur agira au-dessous du piston, tandis que le vide s'opérera au-dessus, et, par conséquent, le piston remontera dans le cylindre. La machine exécutera donc successivement ses deux courses, et elle continuera son mouvement sans interruption, tant que les soupapes continueront de s'ouvrir et de se fermer en temps convenable. Il reste maintenant à expliquer comment le jeu des soupapes est exécuté par la machine elle-même, au moyen de l'encliquetage.

Pour cela, deux montans verticaux MN, MN (*fig.* 78 et 79), élevés sur la plateforme de la machine, et assujettis à une poutrelle transversale *z*, portent quatre axes horizontaux 1, 2, 3, 4, dont chacun sert à manœuvrer une soupape.

L'axe 1 sert à ouvrir et fermer la soupape d'admission d'en haut *a*. Il porte trois petits leviers divergens. Le premier communique par la tige *m* avec la soupape *a*, sur laquelle il agit au moyen d'un levier semblable à *pr*, mais masqué par celui-ci. Le second soutient un contre-poids *o* qui, en tombant, ouvre immédiatement la soupape. La troisième est un levier à patte *k*, qui, lorsqu'on le presse de haut en bas, relève le contre-poids et ferme la soupape. Enfin, sur le même axe, est fixé un petit secteur, qu'on distingue aisément sur la figure. Quand le contre-poids est soulevé, comme il est représenté ici, l'angle supérieur de ce secteur se trouve arrêté par une dent ou barre fixée en-dessous du cliquet $^{\alpha}$, et le contre-poids ne peut retomber; mais, en soulevant un peu la queue $^{\alpha}$ du cliquet, qui tourne autour d'un petit axe fixé au montant de l'encliquetage, le secteur s'échappe de l'arrêt qui le retient, le contre-poids *o* tombe, et la soupape s'ouvre aussitôt. Lorsque ensuite on appuie sur la patte *k*, la soupape se ferme de nouveau, le contre-poids se relève, et le secteur, tournant en-dessous du cliquet, finit par dépasser la dent, qui l'empêche dès lors de reculer.

La soupape inférieure d'admission *a'* est gouvernée par l'axe 4, qui présente une disposition semblable. Cet axe porte également trois leviers : le premier communique

avec la soupape au moyen de la tringle m' ; le second supporte un contre-poids o', qui, par sa chute, ouvre immédiatement la soupape; le troisième est une patte k', qui, lorsqu'on la presse de bas en haut, relève le contre-poids et accroche le secteur correspondant au cliquet α'.

L'axe 2 sert à ouvrir et fermer la soupape d'éduction d'en haut b'. Il porte quatre leviers. Le premier communique avec la soupape par la tringle n' ; le second, non vu sur la figure, supporte un contre-poids qui, en tombant, ouvre la soupape ; le troisième est le levier à manche P', qui, lorsqu'on le presse de bas en haut, relève le contre-poids; enfin, le quatrième est le levier ε', qui supporte une tringle verticale passant dans la guide g', et appuyant sur le cliquet d'en bas α'. Lorsque le contre-poids de l'axe 2 tombe et ouvre la soupape supérieure d'éduction, cette tringle, en pressant sur le cliquet, décroche le secteur de l'axe 4, et la soupape inférieure d'admission s'ouvre à l'instant. Il y a en outre, sur l'axe 2, un quart de cercle qu'on distingue aisément sur la figure, et dont nous indiquerons l'usage dans un instant.

Enfin l'axe 3 sert à manœuvrer la soupape inférieure d'éduction. Il porte, comme le précédent, quatre leviers : le premier communique par la tringle n avec la soupape ; le second supporte un contre-poids o'', qui, en tombant, ouvre la soupape ; le troisième est le levier à manche P, qui, lorsqu'on le baisse, relève le contre-poids et ferme la soupape ; le quatrième est le levier ε, qui porte une tringle verticale passant dans la guide g, et s'élevant jusqu'au cliquet α de la soupape d'admission d'en haut. Quand le contre-poids de l'axe 3 se décroche, et que la soupape inférieure d'éduction s'ouvre, cette tringle, en remontant dans la guide, soulève le cliquet α, et décroche, par conséquent, le contre-poids de l'axe 1, ce qui ouvre à l'instant la soupape supérieure d'admission. En outre, l'axe 3 porte un quart de cercle, comme le précédent.

Les deux quarts de cercle dont nous venons de parler servent à produire le mouvement alternatif des deux axes 2 et 3, en décrochant le contre-poids de l'un quand celui de l'autre s'accroche, et réciproquement ; c'est ce que l'on comprendra facilement. En effet, si l'on suppose, par exemple, que le contre-poids de l'axe 3 soit décroché, l'axe tournera, et son quart de cercle, tournant en même temps, se trouvera engagé sous le quart de cercle de l'axe 2, comme on peut se le représenter en examinant la figure. L'axe 2, quoique sollicité par son contre-poids, se trouvera donc retenu sans pouvoir tourner. Mais si, un moment après, en appuyant sur le levier à manche P pour le baisser, on fait retourner l'axe 3 en arrière, dès que l'angle supérieur de son quart de cercle aura dépassé l'angle inférieur du quart de cercle de l'axe 2, il est clair que celui-ci deviendra libre ; l'axe 2 sera donc entraîné par son contre-poids, et la soupape d'éduction d'en haut s'ouvrira aussitôt. On remarquera que, dans cette action, le quart de cercle de l'axe 2 s'engagera à son tour sous celui de l'axe 3. Il empêchera celui-ci de reculer ou de céder à l'action de son

contre-poids, jusqu'à ce que, en relevant le levier P', on relève le quart de cercle supérieur, ce qui délivrera celui de l'axe 3; alors le contre-poids de celui-ci tombera et ouvrira à l'instant la soupape d'éduction d'en bas. Par conséquent, on voit que, d'après l'action réciproque des deux quarts de cercle, les deux soupapes d'éduction ne peuvent jamais être ouvertes en même temps, mais que, dès que l'une se ferme, l'autre s'ouvre nécessairement aussitôt.

Ces dispositions étant bien comprises, supposons la machine au repos, les contre-poids arrêtés et toutes les soupapes fermées, comme on le voit représenté sur la figure, et que le machiniste, en soulevant le levier à manche P', permette au quart de cercle de l'axe 3 de passer sous celui de l'axe 2 : il est clair que le contre-poids de l'axe 3 tombera, et que la soupape inférieure d'éduction s'ouvrira; mais, dans le même instant, le petit levier *ε*, en soulevant la tringle du cliquet *α*, fera tomber le contre-poids *o*, et ouvrira la soupape supérieure d'admission. Donc la vapeur de la chaudière pénétrera au-dessus du piston en même temps que le vide s'exécutera en-dessous, et, par conséquent, le piston commencera sa course descendante. La tige TT descendra donc en même temps. Quand le piston aura parcouru une partie de sa course, le tasseau *t*, en descendant, rencontrera la patte *k*, qui s'est relevée par la chute du contre-poids, et il l'abaissera. Dans cette action, il fera tourner l'axe 1, relèvera son contre-poids, et le maintiendra ainsi, parce que la longueur du tasseau lui permet de retenir la patte *k* jusqu'à la fin de la course du piston. Dès ce moment, la soupape d'admission d'en haut se trouvera fermée, mais la soupape d'éduction d'en bas continuera d'être ouverte. Ainsi, le piston continuera son mouvement par l'effet de la détente de la vapeur admise jusque-là dans le cylindre, Quand le piston sera près de la fin de sa course, un taquet fixé à la tige TT, mais non vu sur la figure, rencontrera le manche P, qui a été relevé par la chute du contre-poids de l'axe 3, et il le baissera, c'est-à-dire le ramènera à la position marquée sur la figure; alors, la soupape d'éduction d'en bas se trouvera fermée, et le piston sera au bout de sa course descendante. On remarquera que, quand le manche P s'abaisse, la tringle du petit levier *ε* baisse également, et, par conséquent, le cliquet *α* tombe derrière le secteur de l'axe 1. Celui-ci se trouve donc retenu jusqu'au prochain décrochement du cliquet, et le tasseau *t* peut remonter avec la tige TT, sans que, pour cela, le contre-poids *o* puisse retomber.

Mais nous avons dit, en expliquant l'action réciproque des deux quarts de cercle, que quand l'une des deux soupapes d'éduction se ferme, l'autre s'ouvre nécessairement. Dans l'instant que le piston arrive au bas de sa course, et que le taquet de la tige TT, en appuyant sur le manche P, ferme la soupape d'éduction d'en bas, il délivre donc le contre-poids de l'axe 2, et ouvre la soupape d'éduction d'en haut. De plus, dès que l'axe 2 tourne par l'effet de son contre-poids, le petit levier *ε'*, entraîné dans ce mouvement, baisse la tringle du cliquet *α'*, et décroche le contre-poids de l'axe 4, ce qui ouvre la soupape inférieure d'admission. La vapeur de

la chaudière pénètre donc alors en-dessous du piston, tandis que la vapeur située au-dessus s'échappe par la soupape d'éduction d'en haut, et, par conséquent, le piston remonte dans le cylindre en entraînant avec lui la tige TT. Quand il a parcouru une certaine portion de sa course, le tasseau t', fixé à cette tige, relève la patte k', et, comme ce tasseau à une longueur suffisante, il continue de maintenir cette patte relevée jusqu'à la fin de la course. La soupape d'admission d'en bas se trouve alors fermée, et le piston ne continue plus son mouvement que par la détente de la vapeur. Enfin, quand le piston est près d'arriver au sommet de sa course, un taquet fixé à la tige TT, relève le manche P', ce qui ferme la soupape d'éduction d'en haut, et la course remontante est terminée; mais, dans le même instant que la soupape d'éduction d'en haut se ferme, celle d'en bas s'ouvre : la machine fournit donc une nouvelle course descendante, et ainsi de suite. On remarquera que, lorsque le manche P' se relève à la fin de la course montante, la tringle verticale fixée au levier s' se relève aussi, et, par conséquent, le cliquet α' remonte et arrête le secteur de l'axe 4, ce qui fait que la soupape d'admission d'en bas ne peut plus se rouvrir jusqu'à ce que son cliquet soit de nouveau décroché.

Afin que l'on puisse varier, selon le besoin, l'action des contre-poids, ceux-ci sont formés de masses de métal o, o', o'', enfilées dans des leviers mobiles autour des axes y, y', y'', et, en faisant couler ces masses le long des leviers, on peut augmenter ou diminuer leur effet à son gré. Les cliquets α, α', ont de même chacun une petite masse de métal qui leur forme un contre-poids tendant toujours à accrocher le secteur. Enfin, les tasseaux et taquets qui opèrent le mouvement des soupapes ne sont fixés à la tige TT que par des vis de pression; de sorte qu'il est facile d'en changer la position au besoin, selon qu'on veut intercepter la vapeur après une portion plus ou moins longue de la course du piston, ou qu'on veut régler avec plus de justesse la clôture des soupapes d'éduction.

La vapeur, en sortant du cylindre par les soupapes d'éduction, est conduite au condenseur par le tube d'éduction E. Le condenseur est représenté en F; et H est le réservoir d'eau froide. L'eau qui y est contenue pénètre par le robinet f', qu'on ouvre plus ou moins, à volonté, dans le tube f qui traverse le condenseur, et, comme ce tube est percé au milieu, l'eau s'élance de cette ouverture dans le condenseur et y produit instantanément la condensation de la vapeur. La soupape f'' sert à interrompre l'injection quand on arrête la machine, et à *souffler* la machine à l'origine du travail, c'est-à-dire à expulser par un courant de vapeur l'air qui a pu s'introduire dans l'intérieur, ainsi qu'on l'a expliqué dans le chapitre III, § VI. g'' est un clapet qui s'ouvre du condenseur à la pompe d'air G. Ce clapet ne s'ouvre que du dedans au dehors, et, par conséquent, il laisse sortir du condenseur l'air et l'eau condensée qui s'y sont amassés, mais ne les laisse pas rentrer. Le piston g' de la pompe d'air est mis en jeu par la tige TT, suspendue au grand balancier et maintenue exactement dans la direction verticale par les barres

de jonction $t_{\prime}$, $t_{\prime\prime}$, comme nous l'avons dit plus haut. L'air et l'eau aspirés dans la pompe d'air par le mouvement ascendant du piston g', sont ensuite refoulés au fond de la pompe pendant la descente du même piston. Ainsi, ils soulèvent les clapets de celui-ci, passent au-dessus du piston, et de là dans le réservoir d'eau chaude Q, dont le trop-plein s'écoule par le tuyau q.

L'eau chaude, amenée dans le réservoir Q, en est ensuite enlevée par la pompe d'eau chaude, pour servir à l'alimentation de la chaudière. Cette pompe, qui est aspirante et foulante, est figurée en L. Elle est mise en action par un plongeur plein l, attaché à l'extrémité d'une tige suspendue au grand balancier de la machine. l' est sa soupape d'aspiration, et l'' sa soupape de refoulement, qui laisse passer l'eau dans le tuyau d'alimentation de la chaudière.

La machine, ainsi que presque toutes celles de Cornwall, n'a pas de pompe d'eau froide, parce qu'une partie de son travail consistant à tirer de l'eau d'un puits de mine, on utilise une portion de cette eau en l'amenant directement dans le réservoir d'eau froide, sans qu'il y ait nécessité d'employer une pompe particulière pour ce service. Enfin, la machine a deux volans placés l'un près de l'autre, mais dont un seulement se trouve visible sur la figure, l'autre étant caché derrière. Le balancier est porté sur quatre colonnes, dont on ne peut voir non plus que deux, et ses deux bras sont de longueur inégale, le plus long étant du côté du cylindre.

D'après ce que nous avons dit en expliquant l'action de l'encliquetage, les leviers à pattes k et k', qui servent à fermer les soupapes d'admission de la vapeur après que le piston a parcouru une certaine portion de sa course, sont mis en jeu par des tasseaux fixés sur la tige TT, au moyen de vis de pression seulement. Il est donc possible, en changeant ces tasseaux de place, de faire fermer les soupapes d'admission en un point quelconque de la course du piston, et, par conséquent, de faire travailler la machine à un degré quelconque de détente.

On construit aussi beaucoup de machines de ce système, c'est-à-dire à double action, à haute pression, à détente et à condensation, dans lesquelles la distribution de la vapeur se fait au moyen d'un tiroir et d'un excentrique, au lieu de soupapes et d'encliquetages, et l'on se sert d'une soupape *à couper*, qui est placée entre la soupape à gorge et l'entrée du cylindre, pour intercepter la vapeur après que le piston a parcouru une certaine portion de sa course. Mais, comme on trouvera dans l'ouvrage divers exemples de ces dispositions, nous ne croyons pas nécessaire de donner une figure particulière des machines construites d'après ce mode.

ARTICLE II.

FORMULES PRATIQUES POUR LE CALCUL DES MACHINES DE CORNWALL A DOUBLE ACTION.

Les machines de Cornwall à double action n'ayant qu'un seul cylindre, qui sert en même temps à l'admission directe et à l'expansion ou détente de la vapeur,

ne sont autre chose que celles que nous avons traitées dans le chap. IV, quand nous y avons développé les formules générales de l'action de la vapeur sur le piston, par impulsion directe, détente et condensation. Nous ne reproduirons donc pas ici ces formules sous leur forme algébrique, mais nous les remplacerons par les formules numériques qui leur correspondent, et, pour cela, nous tâcherons d'abord de donner une évaluation des constantes qui y figurent.

Comme on l'a dit précédemment, le frottement des machines de Watt, non chargées, peut être évalué à 0.75 livre par pouce carré de la surface du piston, quand le piston a les dimensions moyennes en usage dans ces machines, c'est-à-dire environ 33 pouces ou 2.75 pieds de diamètre. C'est pourquoi nous avons obtenu, pour l'expression du frottement de ces machines, l'évaluation suivante

$$f = 0.75 \times 144 \frac{2.75}{d} = \frac{300}{d},$$

dans laquelle d représente le diamètre du cylindre, exprimé en pieds, et f le frottement de la machine sans charge, exprimé en livres par pied carré ; et, en même temps, nous avons évalué δ, ou le frottement additionnel de la machine par unité de la charge sur le piston, à 0.14 de cette charge (chap. VII, art. II). Nous admettrons donc la même évaluation pour les machines dont nous nous occupons en ce moment et qui sont d'une construction analogue.

Néanmoins, comme nous verrons bientôt, en traitant des machines de Cornwall à simple action, que, d'après les expériences de M. Wicksteed, le frottement de ces machines ne doit être porté qu'à moitié environ de celui des machines de Watt à simple action, de même grandeur, ce qui parait tenir aux perfectionnemens introduits par les ingénieurs de Cornwall dans la construction de leurs machines, et que ces perfectionnemens se rencontrent également dans les machines de Cornwall à double action, lorsqu'elles sont construites par les mêmes ingénieurs, on a lieu de penser que, pour ces machines, l'expérience conduira à faire une réduction dans la valeur de f adoptée plus haut. C'est pourquoi nous ne l'indiquons que sous cette réserve et en attendant des résultats précis.

Nous ne comprenons toutefois dans l'évaluation précédente que le frottement propre à la machine elle-même, et non celui des tiges de renvoi, des roues et arbres d'engrenage et des autres pièces de mécanisme, plus ou moins compliquées, qui peuvent servir ensuite à transformer le mouvement ou à le transmettre à des points souvent très-éloignés. Le frottement ou la résistance de ces différentes pièces de renvoi, quand elles existent, doit être estimé séparément selon les circonstances de leur construction, et déduit ensuite du résultat que nous obtenons pour l'effet utile, lequel ne représente, dans nos calculs, que la quantité de travail disponible sur l'arbre même du volant.

Relativement à la quantité δ, ou au frottement additionnel dû à la charge de la

machine, nous avons déjà fait observer que, dans les diverses espèces de machines, il doit nécessairement suivre des variations analogues à celles de la quantité f, puisque ces deux frottemens dépendent également du mode d'action de la machine et du degré de perfection en usage dans sa construction. Nous évaluerons donc, dans les machines de Cornwall, la quantité δ à la même valeur que dans les machines de Watt; c'est-à-dire que, jusqu'à déterminaison précise, nous ferons

$$\delta = 0.14,$$

mais en faisant toutefois la même réserve que pour la valeur de f.

La pression de condensation dans le cylindre des machines de Cornwall exige aussi quelques observations. Il est évident qu'à pression égale dans le condenseur, la pression subsistant dans le cylindre à vapeur d'une machine quelconque dépend de la dimension des passages de la vapeur, de l'instantanéité de leur ouverture, et de la puissance de la pompe d'air qui agit en même temps dans le condenseur. Or, dans les machines de Cornwall, les passages d'éduction de la vapeur sont de $\frac{1}{14}$ de l'aire du cylindre, au lieu d'être de $\frac{1}{25}$ seulement, comme dans les machines de Watt; de plus, l'usage des soupapes à couronne livre instantanément un très-large passage à la vapeur, au lieu de ne permettre que sa sortie graduelle, comme les soupapes coniques; et, enfin, la pompe d'air est ordinairement double. Dans ces circonstances, il ne paraît pas qu'on puisse admettre une différence sensible de pression, entre le condenseur et le cylindre à vapeur. D'un autre côté, nous verrons que, dans les machines de Cornwall à simple action, la pression dans le condenseur est quelquefois réduite à 0.75 livre par pouce carré; mais, comme cet effet tient surtout à ce que la vapeur n'est admise dans le cylindre qu'à chaque deux courses du piston, et quelquefois même après une autre interruption due à la cataracte, de sorte qu'il y a deux fois plus de temps accordé à la condensation que dans les machines à double action, on ne peut dans celles-ci espérer d'atteindre un vide aussi parfait. Dans les machines de Cornwall à double action, construites avec tous les perfectionnemens en usage, nous évaluerons donc la pression du condenseur à 1.25 livre par pouce carré, comme dans les bonnes machines de Watt, mais sans admettre de différence sensible entre le condenseur et le cylindre. Ainsi, en exprimant cette pression en livres par pied carré de la surface du piston, on aura en général

$$p = 1.25 \times 144.$$

Il faut observer toutefois que cette évaluation n'est qu'approximative et ne doit servir que dans les cas où l'on n'aura pu mesurer directement la pression dans le condenseur, et mieux encore dans le cylindre à vapeur, au moyen de l'indicateur de Watt.

En ce qui concerne la vaporisation *effective* comparée à la vaporisation brute, on doit d'abord observer que la largeur des passages, ainsi que l'exiguïté de l'espace réservé à la vapeur pour sa formation, dans les chaudières cylindriques à foyer inté-

rieur en usage dans les machines de Cornwall, doivent nécessairement produire l'entraînement d'une grande quantité d'eau à l'état liquide et mêlée avec la vapeur. Mais ensuite, comme, pendant l'opération de la détente, le cylindre se trouve maintenu à une très-haute température, au moyen de la vapeur de la chaudière qui circule dans son enveloppe extérieure, il s'ensuit que les additions de calorique ainsi communiquées à l'intérieur du cylindre vaporisent bientôt l'eau qui s'y trouvait tenue en suspension, et que celle-ci contribue elle-même à la production des effets utiles. Cette circonstance, ainsi que nous l'expliquerons avec plus de développement en traitant des machines de Cornwall à simple action, se reconnaît facilement à l'examen des traces d'indicateurs recueillis dans ces machines. On y observe en effet qu'au moment de la clôture de la soupape d'admission, la pression dans le cylindre est moindre que si la totalité de l'eau admise dans le cylindre s'y trouvait réellement à l'état de vapeur; mais, à mesure que le piston avance dans sa course, la pression dans le cylindre s'approche de plus en plus de celle qui correspond à la vaporisation totale de l'eau, et, enfin, quand le piston arrive à la fin de sa course, ces deux pressions ne diffèrent plus entre elles que d'une quantité négligeable. On doit donc conclure de ces observations que, dans les machines de Cornwall construites avec tous leurs perfectionnemens, la haute température du cylindre produit la vaporisation totale de l'eau fournie par la chaudière, et, par conséquent, dans ces machines, la vaporisation effective est égale à la vaporisation brute, où l'on a la condition

$$S = S'.$$

Quant aux constantes du volume spécifique de la vapeur, comme la machine est à condensation, elles devront avoir les valeurs déjà données, savoir, pour les mesures anglaises,

$$m = 4{,}100{,}000,$$
$$n = 250.$$

Enfin, le mouvement du piston étant réglé par une manivelle, la liberté du cylindre est encore moyennement de $\frac{1}{20}$ de la course, comme dans toutes les machines rotatives, ce qui donne

$$c = 0.05l.$$

En recourant donc au besoin à ces évaluations, et faisant les substitutions convenables dans les formules algébriques déjà exposées, on aura les résultats suivans, dans lesquels la valeur de k est

$$k = \frac{l'}{l'+c} + \log \frac{l+c}{l'+c}.$$

Formules pratiques pour les machines de Cornwall à double action (mesures anglaises).

CAS D'UNE CHARGE OU D'UNE VITESSE QUELCONQUES, AVEC UNE DÉTENTE DONNÉE.

$$v = \frac{kS}{a} \cdot \frac{4,100,000}{250 + (1+\delta) r + p + f} \ldots$$ Vitesse du piston, en pieds, par minute.

$$ar = 4,100,000 \frac{kS}{(1+\delta) v} - \frac{a}{1+\delta}(250 + p + f).$$

Charge utile du piston, en livres.

$$S = \frac{av}{k} \cdot \frac{250 + (1+\delta) r + p + f}{4,100,000} \ldots$$ Vaporisation effective, en pieds cubes d'eau, par minute.

$$\text{E. u.} = arv \ldots$$ Effet utile, en livres élevées à 1 pied, par minute.

$$\text{E. u. ch.} = \frac{arv}{33000} \ldots$$ Effet utile, en chevaux.

$$\text{E. u. 1 lb. co.} = \frac{arv}{N} \ldots$$ Effet utile de 1 livre de combustible, en livres élevées à 1 pied.

$$\text{E. u. 1 p. e.} = \frac{arv}{S} \ldots$$ Effet utile de 1 pied cube d'eau, en livres élevées à 1 pied.

$$\text{Q. co. pr. 1 ch.} = \frac{33000\ N}{arv} \ldots$$ Quantité de combustible, en livres, qui produit l'effet d'un cheval.

$$\text{Q. e. pr. 1 ch.} = \frac{33000\ S}{arv} \ldots$$ Quantité d'eau, en pieds cubes, qui produit l'effet d'un cheval.

$$\text{E. u. ch. pr. 1 lb. co.} = \frac{arv}{33000\ N} \ldots$$ Effet utile, en chevaux, produit par livre de combustible.

$$\text{E. u. ch. pr. 1 p. e.} = \frac{arv}{33000\ S} \ldots$$ Effet utile, en chevaux, produit par pied cube d'eau vaporisée.

CAS DU MAXIMUM D'EFFET UTILE, AVEC UNE DÉTENTE DONNÉE.

$$v' = \frac{l}{l'+c} \cdot \frac{S}{a} \cdot \frac{4,100,000}{250 + P} \ldots$$ Vitesse du piston, en pieds, par minute.

$$ar' = \frac{a}{1+\delta} \cdot \frac{l'+c}{l} k (250 + P) - \frac{a}{1+\delta}(250 + p + f).$$

Charge utile du piston, en livres.

$$S = \frac{l'+c}{l} \cdot av' \frac{250 + P}{4,100,000} \ldots$$ Vaporisation effective, en pieds cubes d'eau, par minute.

$$\text{E. u. max.} = ar'v' \ldots$$ Effet utile, en livres élevées à 1 pied, par minute.

CAS DU MAXIMUM ABSOLU D'EFFET UTILE.

$$\frac{l'}{l}=\frac{250+p+f}{250+P} \ldots\ldots\ldots\ldots$$ Détente qui produit le maximum absolu d'effet utile.

Pour faire usage de ces formules, la première chose à faire est de déterminer la quantité k; mais, comme on connaît la détente à laquelle travaille la machine, ou pour mieux dire, le point de la course où commence la détente, savoir, le rapport

$$\frac{l'}{l},$$

on en conclura immédiatement, au moyen de la table donnée dans le chap. IV, art. Ier, la valeur correspondante de k, ainsi que celle de la fraction

$$\frac{l}{l'+c}.$$

Si l'on n'a pas sous les yeux la table dont il vient d'être question, on cherchera directement la valeur du terme

$$\frac{l'}{l'+c};$$

puis, pour obtenir le terme

$$\log\frac{l+c}{l'+c},$$

qui est un logarithme hyperbolique, on cherchera sa valeur dans une table de logarithmes hyperboliques. Si l'on n'en a pas, on prendra, dans les tables communes, le logarithme ordinaire de

$$\frac{l+c}{l'+c},$$

et ce logarithme étant multiplié par le nombre

$$2.302585,$$

fera connaître le logarithme hyperbolique cherché. On obtiendra donc, comme auparavant, la valeur de k, et dès que cette valeur sera connue, les diverses formules n'offriront plus de difficulté, puisqu'elles ne contiennent que des termes au premier degré.

Nous avons dit que les machines de Cornwal travaillent, en général, à la pression absolue de 40 à 50 livres par pouce carré dans la chaudière, que leur frottement moyen, évalué d'après celui des machines de Watt, peut être porté à 0.75 livre par pouce carré, et la pression de condensation sous le piston à environ 1.25

livre par pouce carré. D'un autre côté, nous avons vu que la détente la plus avantageuse au travail de la machine est donnée approximativement par le rapport

$$\frac{l'}{l}=\frac{250+p+f}{250+P}.$$

Il s'ensuit donc que, dans ces machines, le maximum absolu d'effet utile serait en général obtenu en y employant la détente

$$\frac{l'}{l}=\frac{250+2\times 144}{250+40\times 144}=0.09$$

Mais, comme l'usage d'une semblable détente rendrait le mouvement trop inégal, la seule conclusion que nous puissions en tirer est que la détente la plus favorable au travail de la machine est donnée par la plus petite valeur de l'. Dans la pratique, on ne trouve guère possible, pour la régularité du mouvement, d'intercepter la vapeur avant le tiers ou le quart de la course. C'est donc à cette limite que l'on doit s'arrêter pour juger des effets maxima de ces machines, du moins jusqu'à ce qu'on ait trouvé moyen d'y employer une détente plus considérable de la vapeur.

La détente la plus avantageuse étant donc ainsi déterminée par des conditions pratiques étrangères au calcul, et dépendant du degré de régularité exigé par le travail de la machine, en substituant la valeur de l', ainsi trouvée, dans les formules du cas de maximum d'effet avec une détente donnée, on obtiendra toutes les déterminations relatives à l'effet utile maximum que la machine peut produire avec cette détente ; et, puisque celle-ci est la plus favorable possible, ces déterminations se trouveront précisément être celles qui se rapportent au maximum absolu d'effet utile dont est capable la machine.

Si l'on veut former les équations numériques de ces machines en mesures françaises, on aura, pour la valeur la plus ordinaire des constantes :

Frottement, en kilogrammes par mètre carré, d'une machine dont le diamètre du cylindre, exprimé en mètres, est représenté par d,

$$f=\frac{450}{d}.$$

Frottement additionnel par unité de la charge, $\delta=0.14$.

Pression moyenne dans le condenseur et dans le cylindre à vapeur, $p=879$ kilogrammes par mètre carré.

Vaporisation effective égale à la vaporisation brute dans la chaudière.

Constantes du volume spécifique de la vapeur,

$$m=20{,}000{,}000,$$
$$n=1200.$$

Liberté du cylindre, $\frac{1}{20}$ de la course, ou $c=0.05\,l$.

En admettant donc ces évaluations, soumises toutefois aux restrictions mentionnées relativement aux mesures anglaises, et introduisant les quantités m et n dans les équations algébriques, on aura, pour calculer ces machines, les formules suivantes :

Formules pratiques pour les machines de Cornwall à double action (mesures françaises).

CAS D'UNE CHARGE OU D'UNE VITESSE QUELCONQUES, AVEC UNE DÉTENTE DONNÉE.

$$v = \frac{kS}{a} \cdot \frac{20{,}000{,}000}{1200 + (1+\delta)r + p + f} \ldots$$ Vitesse du piston, en mètres, par minute.

$$ar = 20{,}000{,}000 \frac{kS}{(1+\delta)v} - \frac{a}{1+\delta}(1200 + p + f).$$

Charge utile du piston, en kilog^{mes}.

$$S = \frac{av}{k} \cdot \frac{1200 + (1+\delta)r + p + f}{20{,}000{,}000} \ldots$$ Vaporisation effective, en mètres cubes d'eau, par minute.

$$\text{E. u.} = arv \ldots$$ Effet utile, en kilogrammes élevés à 1 mètre, par minute.

$$\text{E. u. ch.} = \frac{arv}{4500} \ldots$$ Effet utile, en chevaux.

$$\text{E. u. 1 k. co.} = \frac{arv}{N} \ldots$$ Effet utile de 1 kilog. de combustible, en kil. élevés à un mètre.

$$\text{E. u. 1 m. e.} = \frac{arv}{S} \ldots$$ Effet utile de 1 mètre cube d'eau vaporisée, en kil. élevés à 1 mètre.

$$\text{Q. co. pr. 1 ch.} = \frac{4500\,N}{arv} \ldots$$ Quantité de combustible, en kilog., qui produit l'effet d'un cheval.

$$\text{Q. e. pr. 1 ch.} = \frac{4500\,S}{arv} \ldots$$ Quantité d'eau, en mètres cubes, qui produit l'effet d'un cheval.

$$\text{E. u. ch. pr. 1 k. co.} = \frac{arv}{4500\,N} \ldots$$ Effet utile, en chevaux, produit par kilogramme de combustible.

$$\text{E. u. ch. pr. 1 m. e.} = \frac{arv}{4500\,S} \ldots$$ Effet utile, en chevaux, produit par mètre cube d'eau vaporisée.

CAS DU MAXIMUM D'EFFET UTILE, AVEC UNE DÉTENTE DONNÉE.

$$v = \frac{l}{l'+c} \cdot \frac{S}{a} \cdot \frac{20{,}000{,}000}{1200 + P} \ldots$$ Vitesse du piston, en mètres, par minute.

$$ar' = \frac{a}{1+\delta} \cdot \frac{l'+c}{l} k(1200 + P) - \frac{a}{1+\delta}(1200 + p + f).$$

Charge utile du piston, en kilog^{mes}.

$S = \frac{r+c}{l} \cdot av' \frac{1200+P}{20,000,000}$ . . . . Vaporisation effective, en mètres cubes d'eau, par minute.

E. u. max. $= ar'v'$. . . . . Effet utile, en kilogrammes élevés à 1 mètre, par minute.

CAS DU MAXIMUM ABSOLU D'EFFET UTILE.

$\frac{r}{l} = \frac{1200+p+f}{1200+P}$ . . . . Détente qui produit le maximum absolu d'effet utile.

Ainsi que nous l'avons expliqué précédemment, cette dernière formule fera connaître la détente qui produit le maximum absolu d'effet utile, et, en la substituant dans les formules du cas de maximum d'effet avec une détente donnée, on aura les effets maxima absolus cherchés.

CHAPITRE IX.

MACHINES DE WOOLF,

OU

MACHINES A DOUBLE ACTION, A HAUTE PRESSION, A CONDENSATION ET A DÉTENTE DANS DEUX CYLINDRES.

ARTICLE I.

DESCRIPTION DE LA MACHINE.

Les machines de Woolf sont des machines *à double action*, *à haute pression*, *à condensation et à détente dans deux cylindres*. Elles sont donc du même genre que celles qui précèdent, c'est-à-dire qu'on y utilise de même la détente de la vapeur; mais seulement, au lieu d'effectuer cette détente dans un seul cylindre, on l'exécute dans deux cylindres inégaux, que la vapeur traverse successivement en se dilatant de plus en plus.

La vapeur formée dans la chaudière sous une pression absolue de 3 à 4 atmosphères environ, est d'abord admise dans la partie supérieure du petit cylindre, et elle y pénètre librement jusqu'à la fin de la course du piston, où elle est interceptée. Alors une communication s'ouvre entre le haut du petit cylindre et le bas du grand. La vapeur qui remplissait la partie supérieure du petit cylindre passe donc dans le grand, et y arrivant au-dessous du grand piston, commence, en se détendant, à faire exécuter à celui-ci une course remontante. Mais, dans le même instant, la communication de la chaudière au petit cylindre, s'ouvrant vers la partie inférieure de celui-ci, y laisse arriver une nouvelle quantité de vapeur, qui pénètre maintenant au-dessous du petit piston, de manière à lui faire exécuter une course ascendante. Les deux pistons remontent donc en en même temps : le petit, par l'action directe de la vapeur de la chaudière; le grand, par la détente de la vapeur qui a servi à l'action précédente du petit cylindre. Quand la course montante est terminée, la vapeur de la chaudière est admise au-dessus du petit piston, tandis que la vapeur qui vient d'opérer la course montante du petit piston passe au-dessus du grand. Ainsi, les deux

pistons, pressés sur leur face supérieure, sont ramenés simultanément au bas des deux cylindres, et le même effet recommence. Enfin, après avoir terminé son action dans le grand cylindre, la vapeur est reçue dans un vase séparé, où elle est condensée.

Les *pl. XVI* et *XVII* représentent une très-belle machine de ce système, construite par MM. Hick de Bolton (Lancashire), et employée comme machine soufflante.

La machine a quatre chaudières *à bouilleurs*, chacune consistant en un tube supérieur de 35 pieds de long sur 4 pieds de diamètre, et deux tubes bouilleurs de 41 pieds de long sur 15 pouces de diamètre, joints au premier par des tubes verticaux, selon la disposition indiquée chap. III, § I. Deux seulement de ces chaudières suffisent à l'action de la machine; les deux autres sont préparées en cas de réparations ou d'accident.

Le petit cylindre de la machine, représenté en A, a 23 pouces de diamètre sur 6 pieds de course pour le piston, et le grand cylindre, représenté en B, a 40 pouces de diamètre sur 8 pieds de course; ainsi, leurs contenances respectives sont dans le rapport de 1 à 4. La séparation qu'on voit en A', dans le petit cylindre, en forme le véritable fond; la partie inférieure ne sert qu'à élever le sommet des deux cylindres à même hauteur. La vapeur arrive de la chaudière par le tube *aa*, qui monte verticalement à côté du petit cylindre. Ce tube est intercepté par une soupape régulatrice *a'* (*fig.* 82 et 83), pareille à celles que nous avons décrites chap. III, § VIII, et qui, selon qu'elle est plus ou moins ouverte, laisse arriver la vapeur, de la chaudière à la machine, en plus ou moins grande quantité. Cette soupape est manœuvrée au moyen d'une poignée *a''*, qui agit sur une barre terminée par une vis de rappel, dont l'effet est de tourner plus ou moins le bras *a'''*, et par suite l'axe qui soulève la soupape. Ce mode de règlement est susceptible d'une grande précision. La machine n'a pas de gouverneur à force centrifuge, parce que son usage ne l'exige pas, l'uniformité du courant d'air qu'elle fournit étant réglée par d'autres moyens.

Après avoir traversé la soupape régulatrice, la vapeur suit le tube de jonction C (*fig.* 83), et les deux passages *c*, *c*, qui, en contournant le petit cylindre, amènent la vapeur à la boîte à tiroir D, dans laquelle elle pénètre par les ouvertures *c'*, *c'* (*fig.* 84). Cette boîte est ainsi toujours remplie de la vapeur de la chaudière, et, selon la position du tiroir, elle laisse pénétrer cette vapeur dans le petit cylindre, soit en-dessus, soit en-dessous du piston. Le tiroir est de la forme ordinaire, décrite chap. III, § III. Il consiste en une pièce creuse *d* (*fig.* 83), qui se meut sur trois ouvertures: l'une aboutissant au port supérieur du petit cylindre; l'autre aboutissant au port inférieur; et enfin la troisième, ou celle du milieu, conduisant du petit cylindre au grand. Lorsque le tiroir est en haut de sa course, ou dans la position représentée sur la *fig.* 84, l'ouverture inférieure 2 se trouve dé-

couverte, et, par conséquent, la vapeur venant de la chaudière, et qui remplit la boîte à tiroir, s'y précipite et pénètre en dessous du piston du petit cylindre. Dans le même instant, le tiroir recouvrant à la fois l'ouverture qui conduit au sommet du petit cylindre et celle qui conduit au grand cylindre, forme une communication entre elles; ainsi la vapeur, alors contenue au-dessus du petit piston, et qui vient d'effectuer la course descendante, s'échappe de la partie supérieure du petit cylindre pour passer dans le grand. Dans l'instant suivant, le tiroir, continuant sa course descendante, découvrira au contraire l'ouverture d'en haut, et couvrira celle d'en bas: alors la vapeur de la chaudière arrivera au-dessus du petit piston, tandis que la vapeur située au-dessous, et qui a terminé son action dans le petit cylindre, s'échappera vers le grand. Le tiroir est mis en mouvement au moyen de sa tige d' (*fig.* 82, 84), et, pour que cette tige puisse sortir au dehors sans donner passage à la vapeur, elle porte une boîte à étoupes d'' d'', qui, pendant les mouvemens de la tige, monte et descend avec elle. Cette boîte à étoupes embrasse un tube intérieur dans lequel passe librement la tige du piston. Cette disposition remplace une boîte à étoupes ordinaire, mais permet d'en placer le couvercle et les écrous en dessus, au lieu de les placer en dessous, comme on aurait été obligé de le faire d'après la direction descendante de la tige d'.

Le passage de la vapeur du petit au grand cylindre s'exécute au moyen du tuyau f (*fig.* 83), dont on voit l'ouverture en f' (*fig.* 84). La vapeur, une fois parvenue dans la colonne d'admission H du grand cylindre, la remplit en totalité, jusqu'à l'entrée des deux soupapes d'admission; et, selon celle de ces soupapes qui se trouve alors ouverte, elle pénètre soit en dessous, soit en dessus du piston du grand cylindre. Comme d'après la disposition de la machine, les deux pistons doivent remonter en même temps, il s'ensuit que lorsque la vapeur sort de la partie supérieure du petit cylindre, ce qui a lieu dans la course remontante du petit piston, elle doit passer dans la partie inférieure du grand cylindre, pour y produire également une course remontante; et c'est ce qu'on voit représenté sur la *fig.* 84. Le contraire a lieu pendant la course descendante des deux pistons; c'est-à-dire que la vapeur inutile sort alors de dessous le petit piston, pour passer au-dessus du grand, en se dilatant en proportion de l'espace qui lui est présenté. Au sommet et au bas du grand cylindre, se trouve une boîte à soupapes, et chacune d'elles est divisée en trois parties, savoir: la portion H' ou H'', formant les deux extrémités de la colonne d'admission H, la portion E' ou E'' formant les extrémités de la colonne d'éduction E, dont nous parlerons dans un instant; et, enfin, la portion intermédiaire I' ou I'', conduisant à l'intérieur du cylindre. Cette troisième portion porte d'ailleurs deux soupapes h' ou h'' et e' ou e'', qui établissent une communication de l'intérieur du cylindre, soit avec la colonne d'admission, soit avec la colonne d'éduction. Ces soupapes sont à *double disque*, comme on le voit sur la figure, et d'une disposition très-avantageuse, en ce qu'elle permet d'ouvrir ou de fermer les soupapes sans aucune résistance de la part

de la vapeur. Dans la position représentée sur la *fig.* 84, la soupape inférieure d'admission h'' se trouve ouverte, ainsi que la soupape supérieure d'éduction e'. La vapeur arrivant du petit cylindre par la colonne H, passe donc sous le grand piston, et le fait remonter dans son cylindre, tandis que la vapeur qui a été reçue dans ce cylindre pendant la course précédente, s'échappe par la soupape e' dans le tube d'éduction E, qui la conduit au condenseur.

Le mouvement du tiroir du petit cylindre, et des soupapes du grand cylindre, est opéré par la machine elle-même, au moyen d'un excentrique K (*fig.* 81), dont la disposition a été déjà expliquée en détail, chap. III, § IV. Il consiste en une roue percée hors de son centre et montée en ce point sur l'arbre de la machine. A mesure que l'arbre tourne, cette roue tourne avec lui; mais, comme elle n'exécute pas ce mouvement autour de son propre centre, il s'ensuit qu'elle passe successivement à droite et à gauche de l'arbre. Dans cette action, elle pousse et tire alternativement la barre k, qui est fixée à une bague embrassant librement la circonférence de la roue. Cette barre agissant à son tour sur un bras fixé à l'axe k', lui donne un mouvement alternatif, qui se transmet à deux autres bras k'' et k''' (*fig.* 82 et 84); et, enfin, ceux-ci lèvent ou baissent le tiroir et les soupapes, selon qu'il convient à l'action de la machine.

Sur la *fig.* 84, on voit que, dans la position où la machine est représentée, le bras de levier k'' tient le tiroir d soulevé, de manière que la vapeur de la chaudière pénètre alors sous le piston du petit cylindre. Sur les *fig.* 82 et 84, on voit que, dans le même instant, le bras de levier k''', en soulevant la tringle de droite m des soupapes, ouvre à la fois la soupape inférieure d'admission du grand cylindre, au moyen du bras m'', et la soupape supérieure d'éduction, au moyen du bras m'. Dans l'instant suivant, le levier k''', éprouvant un changement de position par l'effet de l'excentrique, la tige verticale m se trouvera baissée, de manière que les deux soupapes dont il vient d'être question se fermeront; et en même temps la tige l se relèvera, de sorte que la soupape d'admission d'en haut et la soupape d'éduction d'en bas du grand cylindre, se trouveront ouvertes par le soulèvement des bras l' et l''. De plus, pour que les soupapes d'éduction s'ouvrent toujours un instant avant les soupapes d'admission qui leur correspondent, les étriers où s'engagent les bras l' et m'', pour faire agir les soupapes d'admission, laissent un peu de jeu dans leur partie supérieure, comme on le voit sur la *fig.* 82, à l'insertion des bras dans les étriers. Par ce moyen, les tringles l et m remontent d'abord un peu, et soulèvent, par conséquent, les soupapes d'éduction avant de soulever celles d'admission.

La vapeur, en sortant des soupapes d'éduction, s'écoule par le tube d'éduction EE vers le condenseur qui est représenté en G (*fig.* 84). C'est un large cylindre dans lequel un robinet g permet de laisser pénétrer un jet d'eau froide, qui condense la vapeur à mesure de son arrivée. L'ouverture du robinet d'injection g est d'ailleurs réglée, selon le besoin de la machine, au moyen d'une tringle de renvoi g' (*fig.* 82), à laquelle est attaché un bras fixé à l'extrémité de l'axe g''; de sorte

qu'en tournant cet axe plus ou moins, on peut augmenter ou diminuer à son gré la quantité d'eau injectée dans le condenseur. L'axe g'' porte à son sommet une aiguille mobile sur un cadran, dont les divisions marquent, d'une manière précise, le degré d'ouverture du robinet.

L'eau qui sert à l'injection est contenue dans une une bâche ou réservoir d'eau froide PP (*fig.* 81 et 84), où elle est entretenue à un niveau constant par la pompe d'eau froide qu'on voit représentée en p. Celle-ci, qui est une pompe élévatoire ordinaire, tire l'eau d'un puits, au moyen du tuyau p', et la verse dans la bâche par l'embouchure supérieure de son corps de pompe. Le piston, garni de chanvre, porte une bague mobile p'' p'', qui, pendant le travail, est fixée par des écrous, mais qu'on peut retirer au besoin; et cet arrangement permet de regarnir le piston sans le déplacer. La pompe d'eau froide est d'ailleurs mise en action par le grand balancier de la machine comme on le reconnaît sur la figure. La petite soupape qu'on voit en x (*fig.* 82 et 83) sert à *souffler* la machine, c'est-à-dire à admettre directement la vapeur de la chaudière dans le condenseur et la pompe d'air, à l'origine du mouvement, pour en expulser l'air qui s'y introduit pendant les interruptions du travail. A cet effet, cette soupape communique avec le tube à vapeur a par le tuyau coudé x' x', et, pour laisser cette vapeur pénétrer dans le condenseur, il suffit de lever à la main la soupape x, au moyen de sa tige x'' et du levier x'''.

L'eau d'injection et de condensation amassée dans le fond du condenseur, ainsi que l'air et les gaz dégagés de l'eau de la chaudière pendant son ébullition, sont ensuite retirés du condenseur par l'action de la pompe d'air, qu'on voit représentée en N (*fig.* 81 et 84). Nous avons déjà décrit son action en détail dans le chap. III, § VI. Nous nous contenterons donc de rappeler qu'elle consiste en un corps de pompe parcouru par un piston à clapets n. Ce piston est mis en mouvement par le grand balancier de la machine, comme on le voit sur la figure. Quand le piston n monte dans son corps de pompe, il fait le vide en dessous: alors l'eau et les gaz amassés dans le fond du condenseur ouvrent le clapet de pied, et passent dans la pompe d'air. Ensuite, quand le piston de la pompe d'air redescend, il presse sur l'eau amenée au fond de son corps de pompe, qui soulève les clapets n' n', et passe au-dessous du piston; et enfin, quand celui-ci remonte de nouveau, les clapets n' n' se referment par la pression de l'eau qui les surmonte, et cette eau est élevée par le piston. Une fois parvenue à la hauteur de l'ouverture n'', qui conduit au réservoir d'eau chaude, l'eau amenée du condenseur pénètre dans cette ouverture, ouvre le clapet de décharge qui en ferme l'entrée, et passe dans le réservoir d'eau chaude, mais ne peut rentrer dans la pompe, parce que le clapet de décharge, ainsi que tous ceux dont nous venons de parler, ne s'ouvre que dans le sens de la sortie de l'eau, et non de sa rentrée.

L'eau chaude, ainsi extraite par la pompe d'air, est donc reçue dans le réser-

voir d'eau chaude, qu'on distingue partiellement en O (*fig.* 81 et 84); et elle en est retirée à mesure du besoin, pour être transmise à la chaudière de la machine, dont elle sert à entretenir l'alimentation. A cet effet, la machine est munie d'une pompe d'eau chaude, représentée en *o*, derrière la pompe d'eau froide. C'est une petite pompe foulante, qui aspire l'eau du réservoir d'eau chaude par le tuyau *o'*, et la refoule vers la chaudière, comme nous l'avons expliqué avec plus de développemens, chap. III, § II. Le trop-plein du réservoir d'eau chaude s'en écoule d'ailleurs par le tuyau *o''*, qui la conduit au dehors de la machine.

Pour que les tiges des pistons à vapeur et du piston de la pompe d'air suivent bien exactement la direction verticale de leurs cylindres respectifs, au lieu d'éprouver des déviations latérales par suite des oscillations angulaires du grand balancier, ces tiges sont maintenues par un parallélogramme, dont nous avons expliqué plus particulièrement les effets, chap. III, § V. Ce parallélogramme est formé de trois barres et d'une portion du grand balancier, articulées l'une sur l'autre de manière à former la figure *r r'' s' s''*, mobile aux quatre angles, et composée de quatre lignes égales deux par deux. L'angle *s'* de ce parallélogramme est de plus attaché à une bride *s'* R, qui s'articule sur un tenon R, fixé à l'entablement de la machine, et ici partiellement caché par le balancier. En outre, le parallélogramme porte encore une barre intermédiaire *t' t''*, qui occupe le milieu entre les deux autres; et, enfin, le point *s''* est placé à la moitié du bras du balancier, à partir du centre Y. Cela posé, la tige de la pompe d'air est suspendue au point *s*, situé à moitié de la barre *s' s''*; la tige du petit piston est suspendue en *t*, aux trois quarts de la barre *t' t''*; et, enfin, le piston du grand cylindre est suspendu en *r* à l'extrémité inférieure de la barre *rr''*; et il est facile de se convaincre que, dans cette position, les points d'attache des trois tiges suivront toujours des directions verticales. En effet, si l'on considère d'abord la barre *s'' s'*, dont une des extrémités est attachée en *s''* au grand balancier, et l'autre en *s'* à la bride *s'* R, on reconnaîtra que, pendant les mouvemens angulaires du grand balancier autour du centre Y, l'extrémité *s''* sera déviée à droite et à gauche de la verticale; mais, dans les mêmes instans , l'extrémité *s'* de la même barre sera déviée à gauche et à droite, c'est-à-dire en sens contraire, par les mouvemens angulaires de la bride *s'* R autour de son centre R. Comme la longueur de cette bride est égale à la distance *s''* Y, il s'ensuit que les deux extrémités de la barre *s' s''* seront déviées également, et en sens contraire l'une de l'autre: donc son milieu, ou le point d'attache *s* de la pompe d'air, se trouvera maintenu, sans déviation sensible, dans la verticale. Ce premier point entendu, il sera facile de reconnaître que, d'après la position des autres tiges, elles seront également maintenues dans la verticale de leurs cylindres respectifs. En effet, si l'on mène par le point *s* et par le centre Y du grand balancier une ligne droite, il est clair, d'après les proportions indiquées plus haut, qu'elle coupera la barre *t' t''* aux trois quarts de sa longueur, et la barre *rr''* à son extrémité *r*, c'est-à-dire aux points *t*

et r marqués pour la suspension des tiges des deux pistons; et, quelle que soit la position du balancier dans ses oscillations, cette ligne droite passera toujours par les quatre points Y, s, t, r, de sorte que ces points décriront des lignes parallèles et semblables. Donc, puisque la ligne parcourue par le point s est une ligne droite verticale, il s'ensuit que les lignes parcourues par les points t et r seront également des lignes droites et verticales, c'est-à-dire que les tiges des deux pistons se trouveront maintenues dans la direction exacte de leurs cylindres respectifs.

Comme la machine représentée sur la figure sert de machine soufflante, l'extrémité opposée du grand balancier agit sur un piston mobile dans un cylindre de 90 pouces de diamètre sur 8 pieds de course, qui est garni en haut et en bas de clapets q', q', q'', q'', s'ouvrant du dehors en dedans. Lorsque, par l'action de la machine à vapeur, le piston q descend, les clapets q', q' contenus dans la boite supérieure s'ouvrent pour laisser pénétrer l'air dans le cylindre. Dans le même instant, les clapets inférieurs sont refermés par la compression qui a lieu sous le piston, et l'air comprimé, soulevant le clapet de sortie u'', s'écoule par le tuyau u, qui le conduit au réservoir et aux fourneaux. Quand ensuite le piston q remonte, il aspire l'air extérieur par les clapets inférieurs q'', q'', et le refoule par le clapet u' qui le conduit de même au tuyau de sortie.

La tige du piston du cylindre soufflant est d'ailleurs guidée par un parallélogramme, et, enfin, l'action de la machine est régularisée par l'emploi du volant XX, dont nous avons expliqué les effets, chap. III, § VII.

Dans la machine que nous venons de décrire, la vapeur est admise dans le petit cylindre pendant toute la course du piston, de manière que la détente est fixée invariablement par le rapport des volumes des deux cylindres; mais, on peut également employer une disposition qui permette d'intercepter la vapeur en un point quelconque de la course du petit piston, et, par conséquent, de faire varier la détente à volonté. C'est donc ce dernier cas que nous devrons supposer, pour établir d'une manière générale la théorie des machines de ce système.

ARTICLE II.

THÉORIE DES MACHINES DE WOOLF.

On voit, d'après ce qui précède que, dans les machines de Woolf, le mode d'action de la vapeur est le même que dans les machines traitées d'une manière générale, chap IV, art. II; mais, comme le changement de surface des pistons, sur lesquels agit la vapeur pendant la détente, doit amener quelques modifications dans les formules, nous allons introduire brièvement ces circonstances dans la théorie générale exposée précédemment.

Soient P la pression de la vapeur dans la chaudière, et P' la pression que prend cette vapeur à son entrée dans le petit cylindre, avant la détente. Soient encore A et a les surfaces des deux pistons, L et l leurs courses respectives, et C et c la liberté des deux cylindres. Enfin, soit l' la course d'admission, ou portion de course que parcourt le petit piston avant le commencement de la détente.

Si nous prenons la machine après que son mouvement est parvenu à l'uniformité, la quantité de travail appliquée par la puissance sera égale à la quantité d'action développée dans le même temps par la résistance. Or, l'effort exercé par la puissance se compose de la pression exercée contre le petit piston par la vapeur venue de la chaudière, et de la pression exercée contre le grand par la vapeur venue du petit cylindre. La résistance, au contraire, se compose de la pression produite contre le petit piston par la réaction de la vapeur qui sert de force motrice dans le grand; de la pression subsistant derrière le grand piston, après condensation imparfaite de la vapeur qui a servi à la course précédente; et, enfin, de la charge et du frottement de la machine. Nous allons donc calculer successivement la quantité d'action développée par chacune de ces cinq forces pendant une oscillation du balancier, et nous formerons ensuite l'équation de l'équilibre dynamique de la machine.

1°. En se reportant au calcul qui a déjà été fait dans le chap. IV, art. II, § I, de l'action de la détente de la vapeur, on trouvera que la quantité de travail, développée par l'arrivée directe et la détente de la vapeur dans le petit cylindre, a pour expression

$$a\,(l'+c)\,(n+P')\left(\frac{l'}{l'+c}+\log\frac{l+c}{l'+c}\right)-nal.$$

2°. Pour avoir la quantité de travail moteur, développée de même dans le grand cylindre, pendant une oscillation de la machine, il faut observer que c'est la même vapeur qui, après avoir occupé la longueur $l'+c$ du petit cylindre, avec la pression P', se trouve maintenant répandue en partie au-dessous du petit piston et en partie au-dessus du grand, avec une pression correspondante à l'espace qu'elle occupe.

Si donc, nous considérons le point de l'oscillation de la machine, où le petit piston a parcouru une longueur λ de sa course, et où la pression de la vapeur détendue, au-dessus du grand piston ou au-dessous du petit, est devenue ϖ, il est clair qu'on aura, entre les deux pressions ϖ et P' et les espaces respectivement occupés par la vapeur, la relation générale (c), que nous avons écrite originairement (p. 157) sous la forme

$$p=\frac{M'}{M}\,(n+p')-n,$$

dans laquelle M et M' sont les volumes successifs de la vapeur, et p, p' les pressions correspondantes.

Mais, puisque les courses L et l des deux cylindres sont parcourues dans le même

temps, il s'ensuit que, quand le petit piston aura parcouru la longueur λ de sa course, le grand piston aura parcouru dans la sienne la longueur

$$\frac{L}{l}\lambda.$$

Par conséquent, l'espace occupé par la vapeur dilatée, tant au-dessus du grand piston qu'au-dessous du petit, sera

$$A\left(\frac{L}{l}\lambda+C\right)+a(l-\lambda+c)=\frac{AL-al}{l}\lambda+a(l+c)+AC.$$

Nous l'écrirons, pour un instant, sous la forme

$$O\lambda+Q,$$

en représentant par O le coefficient de λ, et par Q la quantité constante.

Cette expression donne donc la valeur du volume actuellement occupé par la vapeur, sous la pression ω. D'un autre côté, sous la pression P', la même vapeur occupait le volume $a(l'+c)$. On aura donc, d'après la relation générale indiquée, il y a un instant,

$$\omega=\frac{a(l+c)}{O\lambda+Q}(n+P')-n.$$

Par conséquent, en procédant comme auparavant, c'est-à-dire, en multipliant les deux membres de cette équation par $\frac{AL}{l}d\lambda$, puis, prenant l'intégrale entre les limites $\frac{L}{l}\lambda=0$ et $\frac{L}{l}\lambda=L$, ou $\lambda=0$ et $\lambda=l$, on aura la valeur du travail total produit par la détente de la vapeur sur le grand piston, depuis l'origine de la course jusqu'à la fin, savoir :

$$a(l'+c)(n+P')\frac{AL}{Ol}\log\frac{Ol+Q}{Q}-nAL.$$

3°. Pour avoir l'expression de la quantité d'action développée par la résistance de la vapeur, située sous le petit piston, on remarquera que cette vapeur étant à la pression ω, comme celle qui agit dans le grand cylindre, il suffira de multiplier la valeur de ω obtenue plus haut par $ad\lambda$, et d'intégrer entre les limites $\lambda=0$ et $\lambda=l$. Le résultat sera évidemment la quantité d'action développée par la résistance de la vapeur contre le mouvement du petit piston, depuis l'origine de sa course jusqu'à la fin. Il est aisé de voir que le résultat sera le même que celui qu'on vient d'obtenir, à l'exception que a y remplacera $\frac{AL}{l}$. Ce sera donc

$$a(l'+c)(n+P')\frac{a}{O}\log\frac{Ol+Q}{Q}-nal.$$

4°. Si l'on exprime par p la pression subsistant dans le cylindre qui communique avec le condenseur, comme ce cylindre est ici le grand cylindre, la quantité d'action résistante, développée par cette force, pendant une course, sera

$$pAL.$$

5°. Enfin, si l'on représente par R la résistance mise en mouvement par la machine, mesurée, non par unité de surface, mais en grandeur absolue, et par h la distance dont cette résistance avance par coup de piston de la machine, la quantité d'action produite par cette force, durant une course, sera évidemment

$$Rh.$$

D'autre part, si l'on suppose le frottement de la machine représenté par deux forces, l'une f, s'exerçant sur chaque unité de la surface du petit piston, et l'autre F, s'exerçant sur chaque unité de la surface du grand piston, le travail produit par l'ensemble de ces deux forces durant une course sera

$$fal + FAL.$$

Et enfin, si l'on appelle δ le surplus que subit le frottement de la machine, par chaque unité de la résistance R, et mesuré à la même vitesse que cette résistance, la quantité d'action produite par cette dernière force durant une course sera

$$\delta Rh.$$

Ainsi, la quantité d'action totale produite par l'ensemble de ces trois résistances, pendant une oscillation de la machine, sera

$$(1+\delta)Rh + fal + FAL.$$

Nous avons donc tous les élémens du travail développé par la puissance et par la résistance. Par conséquent, en formant l'équation de leur équilibre dynamique, et faisant passer dans le premier membre le terme qui exprime la quantité d'action développée par la troisième des forces évaluées, c'est-à-dire par la réaction de la vapeur contre le petit piston, nous aurons

$$a(l'+c)(n+P')\left[\frac{l'}{l'+c} + \log\frac{l+c}{l'+c} + \frac{AL-al}{Ol}.\log\frac{Ol+Q}{Q}\right] - nAL$$
$$= (1+\delta)Rh + fal + FAL + pAL.$$

Enfin, en remplaçant les quantités O et Q par leur valeur, nous obtiendrons définitivement

$$a(l'+c)(n+P')\left[\frac{l'}{l'+c} + \log\frac{l+c}{l'+c} + \log\frac{A(L+C)+ac}{a(l+c)+AC}\right] - nAL$$
$$= (1+\delta)Rh + fal + FAL + pAL. \qquad \text{(A)}$$

Cette équation est donc la première des deux relations générales que nous vou-

lons établir entre les données et les inconnues du problème. La seconde sera, comme dans les calculs précédens, déduite de la considération de l'égalité entre la production et la dépense de vapeur.

S étant le volume d'eau effectif qui se vaporise par unité de temps dans la chaudière,

$$\frac{mS}{n+P'}$$

sera le volume de la vapeur résultante, mesurée sous la pression P', c'est-à-dire à la pression du petit cylindre avant la détente. D'autre part, v étant la vitesse du petit piston,

$$\frac{v}{l}\,a(l'+c)$$

sera la dépense de vapeur, par unité de temps, mesurée au moment de son passage dans le petit cylindre, avant la détente, c'est-à-dire sous la même pression P'. Ainsi, la seconde équation de relation sera, comme précédemment,

$$\frac{mS}{n+P'}=\frac{v}{l}\,a(l'+c). \qquad \text{(B)}$$

Par conséquent, en éliminant P' entre ces deux équations, et faisant, pour simplifier les formules,

$$\frac{l'}{l'+c}+\log\frac{l+c}{l'+c}+\log\frac{A(L+C)+ac}{a(l+c)+AC}=k',$$

on obtiendra, pour la valeur cherchée de v,

$$v=\frac{l}{L}\cdot\frac{S}{A}\cdot\frac{mk'}{n+\frac{1}{AL}[(1+\delta)Rh+fal+FAL+pAL]}.$$

Cette vitesse sera celle du petit piston; et, de cette vitesse se conclura celle du grand piston, qui sera $\frac{L}{l}v$, et celle du point d'application de la résistance R, qui sera évidemment $\frac{h}{l}v$, ou

$$V=\frac{h}{L}\cdot\frac{S}{A}\cdot\frac{mk'}{n+\frac{1}{AL}[(1+\delta)Rh+fal+FAL+pAL]},$$

puisque la résistance R parcourt la distance h, et le grand piston la distance L, tandis que le piston du petit cylindre parcourt sa course l.

On doit observer que cette valeur de V, d'où se déduisent ensuite toutes les autres

ormules, est entièrement semblable à celle que nous avons obtenue en général, dans le chap. IV, à cela près seulement de la quantité $\frac{h}{L}k'$ au lieu de k, et du terme

$$\frac{1}{AL}[(1+\delta)\,Rh+fal+FAL+pAL],$$

qui remplace maintenant le terme semblable

$$(1+\delta)\,r+p+f.$$

Il sera donc facile de conclure les formules des divers effets de la machine, des formules générales données dans le chap. IV. On remarquera, du reste, que si, dans les deux dernières expressions que l'on vient d'obtenir pour les valeurs de k' et V, on fesait $A=a$, $L=l=h$ et $C=c$, ces valeurs se réduiraient exactement à celles du chap. IV; ce qui doit effectivement arriver, puisque la supposition de $A=a$ et $L=l$ revient à réduire les deux cylindres à un seul.

En fesant donc les calculs comme précédemment, on obtiendra les formules suivantes :

CAS D'UNE CHARGE OU D'UNE VITESSE QUELCONQUES, AVEC UNE DÉTENTE DONNÉE.

$$V=\frac{h}{L}\cdot\frac{S}{A}\cdot\frac{mk'}{n+\frac{1}{AL}[(1+\delta)\,Rh+fal+FAL+pAL]},$$

$$R=\frac{mk'S}{(1+\delta)V}-n\frac{AL}{(1+\delta)h}-\frac{fal+FAL+pAL}{(1+\delta)h},$$

$$S=\frac{L}{h}\cdot\frac{AV}{mk'}\left\{n+\frac{1}{AL}[(1+\delta)Rh+fal+FAL+pAL]\right\},$$

$$\text{E. u.}=RV.$$

CAS DU MAXIMUM D'EFFET UTILE, AVEC UNE DÉTENTE DONNÉE.

$$V'=\frac{h}{l}\cdot\frac{l}{l'+c}\cdot\frac{S}{a}\cdot\frac{m}{n+P},$$

$$R'=\frac{l'+c}{l}\cdot\frac{al}{(1+\delta)h}k'(n+P)-n\frac{AL}{(1+\delta)h}-\frac{fal+FAL+pAL}{(1+\delta)h},$$

$$S=\frac{l}{h}\cdot\frac{l'+c}{l}\cdot\frac{aV'}{m}(n+P),$$

$$\text{E. u. max.}=R'V'.$$

CAS DU MAXIMUM ABSOLU D'EFFET UTILE.

$$\frac{l'}{l}=\frac{AL}{al}\cdot\frac{n+\frac{1}{AL}(fal+FAL+pAL)}{n+P}.$$

Cette dernière formule fera connaître, comme nous l'avons développé ailleurs, la détente qui produit le maximum absolu d'effet utile; et, en introduisant ensuite la valeur ainsi trouvée, dans les formules qui donnent l'effet maximum pour une détente donnée, on aura l'effet maximum que peut produire cette détente, et, par conséquent, l'effet maximum *absolu* de la machine.

Si la machine est sans détente *dans le petit cylindre*, il est clair que l'on aura $l' = l$; par conséquent, le troisième cas ne pourra exister, puisque la détente sera toujours invariable, et le maximum d'effet utile de la machine sera donné par les formules du second cas, en y fesant $l' = l$.

ARTICLE. III.

FORMULES PRATIQUES POUR LE CALCUL DES MACHINES DE WOOLF.

Les formules que nous avons obtenues plus haut n'offrent aucune difficulté dans leur application. Pour les résoudre numériquement, on pourra se servir de la Table donnée dans l'art. Ier. du chap. IV, qui fera d'abord connaître, sans calcul, la valeur de la quantité

$$\frac{l'}{l'+c} + \log \frac{l+c}{l'+c}.$$

Ensuite, ayant calculé l'expression

$$\frac{A(L+C)+ac}{a(l+c)+AC},$$

on en prendra directement le logarithme hyperbolique, dans des Tables de ce système; ou, si l'on n'a point de ces Tables, on en prendra le logarithme ordinaire, dans les Tables de logarithmes communs, et l'on multipliera ce logarithme ordinaire par le nombre

$$2.302585.$$

Le résultat sera le logarithme hyperbolique cherché. On opérerait d'une manière semblable pour la quantité

$$\log \frac{l+c}{l'+c},$$

dans le cas où l'on n'aurait pas sous les yeux la Table du chap. III. On aura donc aisément la valeur de l'expression que nous avons représentée par k', et ainsi, la solution des formules n'offrira plus aucune difficulté; car toutes les quantités qui y figurent y sont engagées au premier degré seulement.

Pour transformer les équations que l'on vient d'obtenir en formules numériques exactes, il faudrait connaître la valeur précise des constantes, et, pour cela, des expé-

riences spéciales sont nécessaires. Cependant, pour montrer la marche du calcul et faire voir que les formules précédentes, quoique compliquées en apparence, se réduiront néanmoins, dans la pratique, à des formes très-simples, nous calculerons ces formules numériques, en nous contentant de la valeur approximative des constantes, que l'on peut déduire de l'analogie de ces machines avec celles déjà traitées.

Dans les machines de Watt, qui n'ont qu'un seul cylindre, le frottement de la machine, sans être chargée, se monte à 0.75 lb par pouce carré de la surface du piston, pour un cylindre de moyennes dimensions; et, pour des machines de dimensions différentes, ce frottement varie en raison inverse du diamètre du cylindre. C'est pourquoi nous avons eu, chap. VII, art. II, § I,

$$f = \frac{300}{d},$$

comme on l'a expliqué alors. Dans une machine de Woolf, il y a deux cylindres au lieu d'un, et l'on doit observer que chacun d'eux entraine à-peu-près les mêmes pièces, et produit à-peu-près le même frottement que s'il était seul dans la machine. Le mode le plus sûr d'évaluer le frottement de ces machines est donc d'attribuer à chacun des deux pistons le frottement qui conviendrait à ses dimensions dans une machine de Watt. Ainsi, l'on aura

$$f = \frac{300}{d}, \quad F = \frac{300}{D},$$

en représentant par d et D les diamètres respectifs des deux cylindres exprimés en pieds, et par f et F les frottemens de la machine exprimés en livres par pied carré de la surface des pistons.

En outre, nous évaluerons au même taux que dans toutes les autres machines, le frottement additionnel par unité de la charge, c'est-à-dire que nous ferons

$$\delta = 0.14.$$

La pression de condensation dans le cylindre en communication avec le condenseur sera de même, dans les bonnes machines,

$$p = 4 \times 144 \text{ lbs.}$$

La liberté du cylindre sera 0.05 de la course, ce qui donne

$$c = 0.05\, l \text{ et } C = 0.05\, L.$$

Et enfin, la machine étant à condensation, on devra prendre

$$m = 4{,}100{,}000,$$

$$n = 250.$$

En admettant donc ces évaluations approximatives, et, se rappellant que la valeur de k' est

$$k' = \frac{l'}{l' + c} + \log \frac{l + c}{l' + c} + \log \frac{A(L + C) + ac}{a(l + c) + AC},$$

on obtient les formules suivantes.

Formules pratiques pour les machines de Woolf (mesures anglaises).

CAS GÉNÉRAL.

$$V = \frac{h}{L} \cdot \frac{S}{A} \cdot \frac{4,100,000\ k'}{250 + \frac{1}{AL}\left[(1 + \delta)\ Rh + fal + FAL + pAL\right]}.$$

Vitesse de la charge, en pieds, par minute.

$$R = 4,100,000 \frac{k'S}{(1 + \delta)\ V} - \frac{1}{(1 + \delta)\ h}\ (250\ AL + fal + FAL + pAL).$$

Charge utile de la machine, en livres.

$$S = \frac{L}{k'h} \cdot \frac{AV}{4,100,000}\left[250 + (1 + \delta)\frac{Rh}{AL} + \frac{1}{AL}\ (fal + FAL + pAL)\right].$$

Vaporisation effective, en pieds cubes d'eau, par minute.

$\text{E. u.} = RV$ . . . . Effet utile, en livres, élevées à 1 pied, par minute.

$\text{E. u. ch.} = \frac{RV}{33000}$ . . . . Effet utile, en chevaux.

$\text{E. u. 1 lb. co.} = \frac{RV}{N}$ . . . . Effet utile de 1 lb. de combustible, en livres élevées à 1 pied.

$\text{E. u. 1 p. e.} = \frac{RV}{S}$ . . . . Effet utile de 1 pied cube d'eau, en livres élevées à 1 pied.

$\text{Q. co. pr. 1 ch.} = \frac{33000\ N}{RV}$ . . . . Quantité de combustible, en livres, qui produit la force d'un cheval.

$\text{Q. e. pr. 1 ch.} = \frac{33000\ S}{RV}$ . . . . Quantité d'eau, en pieds cubes, qui produit la force d'un cheval.

$\text{E. u. ch. pr. 1 lb. co.} = \frac{RV}{33000\ N}$ . . . . Effet utile, en chevaux, produit par livre de combustible.

$\text{E. u. ch. pr. 1 p. e.} = \frac{RV}{33000\ S}$ . . . . Effet utile, en chevaux, produit par pied cube d'eau vaporisée.

CAS DU MAXIMUM D'EFFET UTILE, AVEC UNE DÉTENTE DONNÉE.

$V' = \frac{h}{l} \cdot \frac{l}{l' + c} \cdot \frac{S}{a} \cdot \frac{4,100,000}{250 + P}$ . . . . Vitesse de la charge, en pieds, par minute.

$$R' = \frac{l'+c}{l} \cdot \frac{al}{(1+\delta)h} k' \; (250+P) - \frac{1}{(1+\delta)h} (250\,AL + fal + FAL + pAL).$$

Charge utile de la machine, en livr.

$$S = \frac{l}{h} \cdot \frac{l'+c}{l} \cdot \frac{aV'}{4{,}100{,}000} \; (250+P). \; . \; .$$ Vaporisation effective, en pieds cubes d'eau, par minute.

$$E.\,u.\,max. = R'V' \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; .$$ Effet utile, en livres élevées à 1 pied, par minute.

CAS DU MAXIMUM ABSOLU D'EFFET UTILE.

$$\frac{l'}{l} = \frac{AL}{al} \cdot \frac{250 + \frac{1}{AL}(fal + FAL + pAL)}{250 + P} \; .$$ Détente qui produit le maximum absolu d'effet utile.

La détente du maximum absolu d'effet utile étant déterminée par cette dernière formule, en l'introduisant dans les formules du cas de maximum d'effet pour une détente donnée, on aura le maximum d'effet utile que peut produire cette détente, et, par conséquent, le maximum absolu d'effet utile de la machine. Si la vapeur est admise dans le petit cylindre, pendant toute la course du piston, le troisième cas n'existera pas, et le maximum d'effet utile de la machine sera donné par les formules du second cas, en y fesant simplement $l' = l$.

Enfin, si le calcul se fait en mesures françaises, la valeur des constantes devient :

Frottement du petit piston, en kilogrammes par mètre carré de la surface de ce piston, dont le diamètre, mesuré en mètres, est exprimé par d, $f = \frac{450}{d}$.

Frottement du grand piston, en kilogrammes par mètre carré de la surface de ce piston, dont le diamètre, mesuré en mètres, est exprimé par D, $F = \frac{450}{D}$.

Frottement additionnel de la machine par unité de la résistance, $\delta = 0.14$.

Pression de condensation dans le cylindre, 0.2811 kilogramme par centimètre carré; ou $p = 2811$ kilogrammes par mètre carré.

Liberté du cylindre, $\frac{1}{20}$ de la course; ou $c = 0.05\,l$, et $C = 0.05\,L$.

$$m = 20{,}000{,}000,$$
$$n = 1200.$$

Enfin, en se rappelant qu'on a pour la valeur de k',

$$k' = \frac{l'}{l'+c} + \log \frac{l+c}{l'+c} + \log \frac{A(L+C)+ac}{a(l+c)+AC};$$

les formules numériques deviennent :

Formules pratiques pour les machines de Woolf (mesures françaises).

CAS GÉNÉRAL.

$$V = \frac{h}{L} \cdot \frac{S}{A} \cdot \frac{20{,}000{,}000\, k'}{1200 + \frac{1}{AL}[(1+\delta)Rh + fal + FAL + pAL]}.$$

Vitesse de la charge, en mètres, par minute.

$$R = 20{,}000{,}000 \frac{k'S}{(1+\delta)V} - \frac{1}{(1+\delta)h}(1200\,AL + fal + FAL + pAL).$$

Charge utile de la machine, en kilogrammes.

$$S = \frac{L}{k'h} \cdot \frac{AV}{20{,}000{,}000}\left[1200 + (1+\delta)\frac{Rh}{AL} + \frac{1}{AL}(fal + FAL + pAL)\right].$$

Vaporisation effective, en mètres cubes d'eau, par minute.

$\text{E. u.} = RV$. . . . . Effet utile, en kilogrammes élevés à 1 mètre, par minute.

$\text{E. u. ch.} = \frac{RV}{4500}$. . . . . Effet utile, en chevaux.

$\text{E. u. 1 k. co.} = \frac{RV}{N}$. . . . . Effet utile de 1 kilogramme de combustible, en kil. élevés à 1 mètre.

$\text{E. u. 1 m. e.} = \frac{RV}{S}$. . . . . Effet utile de 1 mètre cube d'eau, en kilogrammes élevés à 1 mètre.

$\text{Q. co. pr. 1 ch.} = \frac{4500\,N}{RV}$. . . . . Quantité de combustible, en kilog., qui produit la force d'un cheval.

$\text{Q. e. pr. 1 ch.} = \frac{4500\,S}{RV}$. . . . . Quantité d'eau, en mètres cubes, qui produit la force d'un cheval.

$\text{E. u. ch. pr. 1 k. co.} = \frac{RV}{4500\,N}$. . . . . Effet utile, en chevaux, produit par kilogramme de combustible.

$\text{E. u. ch. pr. 1 m. e.} = \frac{RV}{4500\,S}$. . . . . Effet utile, en chevaux, produit par mètre cube d'eau vaporisée.

CAS DU MAXIMUM D'EFFET UTILE, AVEC UNE DÉTENTE DONNÉE.

$V' = \frac{h}{l} \cdot \frac{l}{l'+c} \cdot \frac{S}{a} \cdot \frac{20{,}000{,}000}{1200+P}$. . . . . Vitesse de la charge, en mètres, par minute.

$$R' = \frac{l'+c}{l} \cdot \frac{al}{(1+\delta)h} k'(1200+P) - \frac{1}{(1+\delta)h}(1200\,AL + fal + FAL + pAL).$$

Charge de la machine, en kilog^mes.

$S = \frac{l}{h} \cdot \frac{l'+c}{l} \cdot \frac{aV'}{20{,}000{,}000}(1200+P)$. Vaporisation effective, en mètres cubes d'eau, par minute.

$\text{E. u. max.} = R'V'$. . . . . Effet utile, en kilogrammes élevés à 1 mètre, par minute.

CAS DU MAXIMUM ABSOLU D'EFFET UTILE.

$$\frac{l'}{l} = \frac{\mathrm{AL}}{al} \cdot \frac{1200 + \frac{1}{\mathrm{AL}}(fal + \mathrm{FAL} + p\mathrm{AL})}{1200 + \mathrm{P}} \ldots$$ Détente qui produit le maximum absolu d'effet utile.

Nous nous bornons, pour ce dernier cas, à cette seule formule, parce que nous avons expliqué comment on en déduira d'abord la détente du maximum absolu d'effet utile, et, par suite, les effets maxima correspondans à cette détente, qui sont les effets cherchés.

CHAPITRE X.

MACHINES D'EVANS,

OU

MACHINES A DOUBLE ACTION, A HAUTE PRESSION, A DÉTENTE ET SANS CONDENSATION.

ARTICLE I.

DESCRIPTION DE LA MACHINE.

Les machines d'Evans sont des machines *à double action*, *à haute pression et à détente sans condensation*. La vapeur est formée dans la chaudière sous une pression absolue, qui varie, selon les machines, entre 50 et 120 livres par pouce carré, ou de 3 à 8 atmosphères, et elle est admise dans le cylindre pendant une portion de la course, qui varie en général de moitié au tiers de la course totale du piston. Ensuite, la communication de la chaudière au cylindre est interceptée, et le piston continue son mouvement au moyen de la détente de la vapeur; après quoi, cette vapeur s'échappe dans l'atmosphère sans avoir été condensée.

La *pl. XVIII* représente une machine de ce système. La chaudière est de la forme *cylindrique à foyer intérieur*, décrite dans le chap. III, § I. Elle est placée dans une chambre voisine de celle qui contient la machine elle-même, et séparée seulement par un mur.

La machine consiste en un cylindre à vapeur parcouru par un piston, qui met en jeu une manivelle fixée sur l'arbre d'un volant, et produit le travail industriel de la machine. Ainsi que nous l'expliquerons dans un instant avec plus de détail, le cylindre porte, d'un côté, deux ouvertures pour l'admission de la vapeur, l'une pour le dessus, l'autre pour le dessous du piston, et du côté opposé, deux autres passages pour la sortie de la vapeur, soit du dessus, soit du dessous du piston. Chacun des deux premiers passages est intercepté par deux tiroirs. Le premier de ces tiroirs ouvre le passage au commencement de la course, pour laisser pénétrer la vapeur dans le cylindre; le second ferme le même passage après que le piston a parcouru seulement

moitié de la longueur du cylindre, et le reste de la course s'effectue par la détente de la vapeur. Chacun des deux passages de sortie est intercepté par un tiroir seulement, qui s'ouvre en temps convenable pour laisser sortir la vapeur, qui a terminé son action dans la machine. Ensuite, cette vapeur est conduite, par le tube d'éduction, dans l'intérieur d'un tube de gros diamètre contenant l'eau qui doit servir à l'alimentation de la chaudière, et après avoir communiqué à cette eau la plus grande partie du calorique qu'elle contenait encore, la vapeur s'échappe dans la cheminée du foyer de la machine.

Sur la figure, le tube V est celui par lequel la vapeur arrive de la chaudière pour se rendre au cylindre de la machine. Celui-ci est contenu dans une chemise ou enveloppe que l'on voit en N, et l'intervalle entre cette enveloppe et le cylindre, est rempli d'air. La vapeur traverse d'abord la soupape à gorge *v*, dont l'ouverture est réglée par le gouverneur à force centrifuge, comme on le dira dans un instant. Ensuite elle pénètre dans la colonne d'admission A, qui est creuse et contient à chacune de ses extrémités une boîte à tiroirs A', A'', dont la première communique avec le haut du cylindre pour admettre la vapeur au-dessus du piston, et la seconde avec le bas du cylindre, pour admettre la vapeur dans la direction contraire. Ces boîtes à vapeur sont disposées comme celles que nous avons décrites chap. III, § III, et qui sont représentées dans la *fig.* 53, *pl. VIII*; c'est-à-dire qu'elles présentent un passage qui peut être ouvert ou fermé par le moyen d'un tiroir plat ou d'une plaque métallique qui glisse dans une rainure, comme une vanne de moulin. Cette plaque est pressée par l'action même de la vapeur contre la face de la rainure opposée à l'arrivée de la vapeur, et pour que son contact en ce point s'oppose avec efficacité au passage de la vapeur, sans cependant causer un frottement considérable, on forme la face de contact d'une plaque d'acier poli, contre laquelle s'exécute le mouvement. Les deux tiroirs, supérieur et inférieur, pour l'admission de la vapeur, sont montés sur un même chariot *a*, *a*, qui est vu de côté dans la *fig.* 86, et de face dans la *fig.* 85. Quand ce chariot est levé, comme il est représenté ici, il soulève les deux tiroirs, et, par conséquent, ouvre le passage d'en bas et ferme celui d'en haut, comme on le reconnaît sur la *fig.* 53 déjà citée. Ainsi, la vapeur pénètre alors sous le piston. Lorsqu'au contraire ce chariot est baissé, il ouvre le passage d'en haut et ferme celui d'en bas, ce qui admet la vapeur en sens contraire.

En outre, dans les mêmes boîtes, il y a deux autres tiroirs semblables aux premiers, et qui sont destinés à intercepter la communication avec la chaudière, quand on veut faire commencer la détente de la vapeur. Ces deux tiroirs de détente sont montés sur un même chariot *d*, *d*, et se meuvent de même dans deux rainures verticales situées entre celles des tiroirs d'admission et la soupape à gorge. Ils sont également disposés de manière que, quand le chariot *d*, *d*, se lève, il ouvre le passage d'en bas et ferme celui d'en haut, et que, lorsqu'il se baisse, il produit un effet contraire. Dans la figure, les deux tiroirs de détente sont à moitié de leur course, de

sorte que le tiroir d'en bas commence à se fermer et celui d'en haut à s'ouvrir. Dès ce moment la vapeur est donc interceptée dans le port d'en bas du cylindre, quoique le tiroir d'admission en ce point continue néanmoins d'être ouvert; et quant au port d'en haut, il est effectivement découvert par le tiroir de détente; mais, comme il reste intercepté par le tiroir d'admission, il s'ensuit qu'il est également fermé. Ainsi, dès que les tiroirs de détente ont pris la position indiquée sur la figure par le chariot *d*, *d*, la vapeur admise jusque-là en dessous du piston se trouve interceptée, et le piston ne continue plus sa course qu'en vertu de la détente. Dans la course descendante du piston, un effet semblable se produit; c'est-à-dire que le tiroir d'admission découvre alors le port supérieur du cylindre, pendant toute la course, mais qu'à moitié de cette course, le tiroir de détente, en se relevant, vient intercepter le passage, et que la vapeur commence à se détendre dans le cylindre jusqu'à ce que le piston ait complété sa course entière.

Après que la vapeur a terminé son action dans le cylindre, soit au-dessus, soit au-dessous du piston, un passage s'ouvre pour la laisser s'échapper dans le tuyau d'éduction, et de là dans la cheminée. A cet effet, du côté du cylindre opposé à l'arrivée de la vapeur, est une autre colonne creuse E. Cette colonne forme le commencement du tube d'éduction. A chacune de ces extrémités supérieure et inférieure, elle est jointe au cylindre par une boîte à tiroirs E', E'', qui contient un tiroir plat semblable à ceux déjà décrits. Ces deux tiroirs d'éduction sont encore montés sur un même chariot *e*, *e*, et ils sont disposés de telle sorte que, quand le chariot se lève, il ouvre le tiroir d'en bas et ferme celui d'en haut, et qu'en se baissant il produit les effets contraires. On voit d'après cela que, dans la position représentée sur la figure, le port d'éduction d'en haut se trouve ouvert, et le port d'éduction d'en bas fermé. La vapeur continue donc alors de sortir de dessus le piston, tandis que la vapeur admise en dessous jusque-là commence à agir par sa détente. La vapeur, en sortant de la colonne d'éduction, s'écoule par un tube qui se recourbe sous la plate-forme de support du cylindre, et suit l'angle M, pour aller gagner le tube d'échauffement de l'eau d'alimentation, comme on l'a dit plus haut. Ainsi l'on voit, d'abord, comment la vapeur est admise sur le piston dans chaque course, comment elle est ensuite interceptée avant la fin de cette course pour faire produire la détente, et comment enfin elle se dégage de la machine quand son action est terminée.

Le mouvement des chariots *a*, *d*, *e*, qui portent les tiroirs, est exécuté par trois excentriques vus partiellement dans la *fig*. 86, mais cachés dans la *fig*. 85 par le pilastre M, et dont les tiges sont représentées en a', d', e'. A cet effet, trois axes horizontaux a'', d'', e'' sont fixés sur la plaque de la machine par des coussinets de support. Ces axes portent chacun trois leviers horizontaux, dont deux servent à soulever les chariots respectifs, et dont le troisième est mis en mouvement par la tige de l'excentrique correspondant. Par exemple, pour les tiroirs d'éduction, les deux leviers qui soulèvent le chariot se projettent en e''', e''' sur la *fig*. 85, et

en e'' e''' sur la *fig.* 86. Le levier qui reçoit le mouvement de l'excentrique se trouve caché dans la *fig.* 86, mais il se projette en ϵ sur la *fig.* 85, où l'on voit l'extrémité de la tige d'excentrique e', qui traverse la plaque de support du cylindre dans une rainure pratiquée pour lui donner passage. On conçoit que, quand la tige e' se soulève par l'action de son excentrique, elle soulève l'extrémité du levier horizontal ϵ, fait tourner légèrement l'axe e'', et, par conséquent, soulève le chariot e, e' par l'intermédiaire des tringles verticales $e'''e$. Il en est de même pour les deux autres chariots. Les leviers du chariot, pour le tiroir d'admission, se projettent en a'' a''' sur la *fig.* 86, et sont cachés derrière les points e''', e''' dans l'autre figure; le levier de son excentrique est caché derrière le levier a'' a''' dans la *fig.* 86, et derrière le point ϵ, dans la *fig.* 85. Enfin, les leviers du chariot, pour le tiroir de détente, se projettent en d'' d''' dans les deux figures. Les trois excentriques étant donc placés convenablement sur l'arbre du volant, on conçoit facilement qu'ils exécuteront successivement les trois mouvemens suivans, savoir : au commencement de chaque course, ils lèveront ou baisseront le chariot des tiroirs d'admission, et, dans le même instant, donneront un mouvement contraire à celui des tiroirs d'éduction; ensuite, après environ moitié de la course parcourue, ils baisseront ou lèveront le chariot des tiroirs de détente ; et, de cette manière, la distribution de la vapeur se trouvera réglée d'une manière convenable dans la machine.

Pour maintenir la tige du piston dans la direction précise de l'axe du cylindre, un châssis CC, porté sur quatre petites colonnes, s'élève au-dessus de ce cylindre. Ce châssis présente deux guides verticales c, c, qui sont embrassées par des douilles c', c', fixées à l'extrémité de la traverse f f, laquelle est assujettie à l'extrémité de la tige du piston. Les douilles c', c', sont composées de deux portions renfermant des étoupes imprégnées d'huile, afin que le mouvement soit exactement guidé sans créer de frottement. A cette traverse f f sont suspendues les deux bielles F, F, qui, par l'intermédiaire de la traverse inférieure f' f' et de la bielle principale F', mettent en mouvement la manivelle du volant. Celle-ci se voit en H sur les deux figures. La tige du piston, à son entrée dans le cylindre, traverse une boite à étoupes pour empêcher l'échappement de la vapeur, et il en est de même de la tige des tiroirs d'admission, de détente et d'éduction.

Le mouvement de la machine est réglé par un gouverneur à force centrifuge, représenté en K (*fig.* 85). Il est mis en mouvement par deux roues d'angle : l'une montée sur l'arbre du volant, et l'autre, sur l'axe du gouverneur. Quand la machine prend un mouvement trop rapide, ce mouvement, en se communiquant à l'axe du gouverneur, écarte les boules k, k. Comme le collier supérieur k' est fixé sur l'axe, et que le collier inférieur k'' est au contraire mobile, l'écartement des boules élève le collier k'', et, par l'intermédiaire de deux petites tringles k''', communique le même mouvement à la douille supérieure K'. Celle-ci, en remontant, soulève la tringle K'', et, par une communication de petits leviers attachés au plafond de la

chambre, baisse la tringle g et ferme davantage la soupape à gorge. Pour que les effets contraires se produisent facilement quand la machine diminue sa vitesse, un contre-poids K''' et un ressort en hélice que l'on voit près du collier inférieur du gouverneur, tendent continuellement à tirer les tringles et à rouvrir, par conséquent, la soupape à gorge. La poignée de celle-ci est représentée en g' (*fig.* 86). Elle porte une rainure qui permet d'augmenter l'effet du gouverneur, pour ouvrir ou fermer la soupape ; et, en outre, le long de la tringle g, est un écrou à main g'', qui réunit en ce point deux tiges dont l'ensemble forme la tringle g. Les extrémités de ces deux tiges sont taraudées en sens contraire et engagées dans l'écrou, de sorte qu'en tournant celui-ci dans un sens, on rapproche les bouts des deux tiges, et, par conséquent, on raccourcit la tringle g, et qu'en tournant l'écrou dans le sens contraire, on rallonge au contraire la même tringle. Cette disposition permet de régler la soupape à gorge sur le gouverneur, comme nous l'avons dit dans le chap. III, § VII.

L'arbre du volant porte en L une roue dentée engrenant dans une autre roue L' d'un diamètre double, et, par conséquent, d'une vitesse de moitié, qui met en mouvement un second arbre horizontal, au moyen duquel s'exécute le travail définitif de la machine. La roue dentée L' porte elle-même un bouton à rotule fixé hors de son centre, et sur lequel est articulée une tige faisant fonction d'excentrique. Cette tige sert à mettre en jeu la pompe d'alimentation P de la chaudière. En effet, quand le bouton à rotule, qui agit comme une manivelle, passe en avant et en arrière du centre de la roue L', il pousse et tire alternativement la tige dont nous avons parlé. D'un autre côté, celle-ci aboutissant à un petit levier fixé sur un axe horizontal p'', fait osciller cet axe, et, par conséquent, soulève les bras p', p', qui portent le chariot p, p de la pompe d'alimentation. Le plongeur P de cette pompe monte donc et descend successivement, et, par conséquent, la pompe exécute l'alimentation de la chaudière, comme nous l'avons expliqué précédemment, chap. III, § II. Afin qu'on puisse, selon le besoin, entretenir seulement le niveau de l'eau, ou remplir la chaudière rapidement, l'extrémité de la tige à excentrique peut s'embrayer en deux points différens du levier de l'axe p''. Par ce moyen, on peut donner à la pompe d'alimentation, soit sa course habituelle, qui suffit aux besoins réguliers de la machine, soit une course double, qui permet une alimentation beaucoup plus rapide.

ARTICLE II.

FORMULES PRATIQUES POUR LE CALCUL DES MACHINES D'EVANS, ET EXEMPLE DE LEUR APPLICATION.

D'après ce qu'on vient de voir, la vapeur agit par détente, dans les machines d'Evans, de la même manière que dans celles de Cornwall à double action. Ainsi, les

formules propres à les calculer sont les mêmes que celles qui ont été indiquées dans le chap. VIII, et que nous avons extraites des art. II et III du chap. IV. La seule différence est que la quantité P représentera, en général, une pression de formation de la vapeur beaucoup plus considérable, et que la quantité p, au lieu d'exprimer la pression due à la condensation imparfaite de la vapeur, exprimera la pression atmosphérique.

Nous ne donnerons donc pas ces formules sous leur forme algébrique, puisque ce ne serait que la répétition pure et simple de celles du chap. IV; mais nous les présenterons sous leur forme numérique, en fixant, par approximation, la valeur des constantes qui y figurent, d'après l'analogie de ces machines avec celles dont nous nous sommes occupé jusqu'ici.

Pour cela, à défaut de données spéciales, nous admettrons, pour le frottement, l'évaluation qui a été déduite de l'expérience dans les machines de Watt à double action, chap. VII, art. II, c'est-à-dire qu'en représentant par d le diamètre du cylindre de la machine exprimé en pieds, son frottement en livres par pied carré de la surface du piston aura pour expression

$$f = \frac{300}{d}.$$

En outre, nous admettrons encore, comme précédemment, les déterminations suivantes :

Frottement additionnel de la machine, par unité de la résistance qui lui est imposée, $\frac{1}{7}$ de cette résistance, ou $\delta = 0.14$.

Pression atmosphérique par par pied carré, $p = 14.71 \times 144 = 2118$ lbs.

Liberté du cylindre, $c = 0.05\, l$.

Enfin, les constantes du volume spécifique de la vapeur seront, comme dans les machines sans condensation,

$$m = 4{,}348{,}000,$$
$$n = 620.$$

En admettant donc ces données, et se rappelant que la valeur de k est

$$k = \frac{l'}{l' + c} + \log \frac{l + c}{l' + c},$$

on aura, pour calculer ces machines, les équations suivantes.

Formules pratiques pour les machines d'Evans (mesures anglaises).

CAS GÉNÉRAL.

$$v = \frac{kS}{a} \cdot \frac{4{,}348{,}000}{2738 + (1 + \delta) r + f} \ldots\ldots$$ Vitesse du piston, en pieds, par minute.

$ar = 4{,}348.000 \frac{kS}{(1+\delta)v} - \frac{a}{1+\delta} 2738 + f).$ Charge utile du piston, en livres.

$S = \frac{av}{k} \cdot \frac{2738 + (1+\delta)r + f}{4{,}338{,}000}$. . . . . . . Vaporisation effective, en pieds cubes d'eau, par minute.

$E.\ u. = arv$. . . . . Effet utile, en livres élevées à 1 pied, par minute.

$E.\ u.\ ch. = \frac{arv}{33000}$. . . . . Effet utile, en chevaux.

$E.\ u.\ 1\ lb.\ co. = \frac{arv}{N}$. . . . . Effet utile de 1 livre de combustible, en livres élevées à 1 pied.

$E.\ u.\ 1\ p.\ e. = \frac{arv}{S}$. . . . . Effet utile de 1 pied cube d'eau, en livres élevées à 1 pied.

$Q.\ co.\ pr.\ 1\ ch. = \frac{33000\ N}{arv}$. . . . . Quantité de combustible, en livres, qui produit l'effet d'un cheval.

$Q.\ e.\ pr.\ 1\ ch. = \frac{33000\ S}{arv}$. . . . . Quantité d'eau, en pieds cubes, qui produit l'effet d'un cheval.

$E.u.ch.pr.1\,lb.\,co. = \frac{arv}{33000\ N}$. . . . . Effet utile, en chevaux, produit par livre de combustible.

$E.\ u.\ ch.pr.1\ p.\ e. = \frac{arv}{33000\ S}$. . . . . Effet utile, en chevaux, produit par pied cube d'eau vaporisé.

CAS DU MAXIMUM D'EFFET UTILE, AVEC UNE DÉTENTE DONNÉE.

$v' = \frac{l}{l'+c} \cdot \frac{S}{a} \cdot \frac{4{,}348{,}000}{620 + P}$. . . . . Vitesse du piston, en pieds, par minute.

$ar' = \frac{a}{1+\delta} \cdot \frac{l'+c}{l} k(620 + P) - \frac{a}{1+\delta}(2738 + f).$

Charge utile du piston, en livres.

$S = \frac{l'+c}{l} \cdot av' \frac{620 + P}{4{,}348{,}000}$. . . . . . . Vaporisation effective, en pieds cubes d'eau, par minute.

$E.\ u.\ max. = ar'v'$. . . . . Effet utile, en livres élevées à 1 pied, par minute.

CAS DU MAXIMUM ABSOLU D'EFFET UTILE.

$\frac{l'}{l} = \frac{2738 + f}{620 + P}$. . . . . Détente qui produit le maximum absolu d'effet utile.

Cette dernière relation fait connaître la détente qui produit le maximum absolu d'effet utile, et, en l'introduisant dans les formules qui donnent le maximum d'effet utile pour une détente donnée, on en tirera toutes les déterminations relatives au maximum absolu d'effet utile de la machine.

Dans les machines de ce système, où l'on forme la vapeur à la pression de 120 lbs. par pouce carré dans la chaudière, on voit, d'après la dernière formule, et en se reportant d'ailleurs à l'évaluation que nous avons faite du frottement, que la détente du maximum absolu d'effet utile sera donnée par la relation

$$\frac{l'}{l} = \frac{3170}{17900} = 0.18;$$

c'est-à-dire que, pour produire les plus grands effets possibles, on devra intercepter l'admission de la vapeur environ au cinquième de la course. Dans les machines où l'on n'emploie la vapeur qu'à la pression absolue d'environ 55 livres par pouce carré, la même formule donne

$$\frac{l'}{l} = 0.35.$$

C'est donc entre 0.35 et 0.20 de la course du piston, selon la pression de la vapeur dans la chaudière, qu'il convient d'intercepter la vapeur dans le cylindre, ou plutôt qu'il conviendrait d'intercepter la vapeur si les conditions du travail industriel à exécuter ne s'y opposaient pas: Mais, comme on a reconnu, par expérience, qu'il est difficile d'admettre, dans les machines rotatives, une détente commençant avant le tiers environ de la course parcourue, parce que sans cela les irrégularités du mouvement deviennent trop considérables, il est clair qu'on ne pourra, pratiquement, pousser la détente plus loin. Ainsi, la formule précédente indique seulement la limite de détente vers laquelle il faut tendre, autant que possible, pour faire produire à la machine son plus grand effet; mais c'est par la construction propre de chaque machine qu'on se déterminera à cet égard.

Pour donner un exemple de l'application de ces formules, nous chercherons quels sont les effets qu'on peut attendre d'une machine de ce système établie à la distribution publique des eaux de la ville de Brighton, en Angleterre. Cette machine présente les dimensions et données suivantes:

Diamètre du cylindre, 16.5 pouces, ou surface du piston, $a = 1.4849$ pied carré.

Course du piston, 3 pieds, ou $l = 3$.

Détente de la vapeur, commençant à 0.317 de la course du piston, ou $\frac{l'}{l} = 0.317$.

Vaporisation brute, 0.317 pied cube d'eau par minute, ou, en en retranchant les 0.05 pour l'eau enlevée à l'état liquide, vaporisation *effective* $S = 0.301$.

Consommation de houille dans le même temps, 2.845 livres, ou $N = 2.845$.

Si donc, on se propose de déterminer quelle est la charge que cette machine pourra mettre en mouvement aux vitesses respectives de 250 et 200 pieds par minute, et à la vitesse du maximum d'effet utile pour la détente adoptée, on obtiendra les résultats suivans.

Effets de la machine avec la détente 0.317, *et la vaporisation effective* S = 0.301.

			Maximum d'effet utile.
v	= 250	... 200	... 183
ar	= 3144	... 4892	... 5711
$\frac{r}{144}$	= 14.70	... 22.88	... 26.71
S	= 0.301	... 0.301	... 0.301
E. u.	= 786,000	... 978,410	... 1,045,100
E. u. ch.	= 23.82	... 29.65	... 31.67
E. u. 1 lb. co.	= 276,280	... 343,910	... 367,350
E. u. 1 p. e.	= 2,612,800	... 3,252,450	... 3,474,200
Q. co. pr. 1 ch.	= 0.120	... 0.096	... 0.090
Q. e. pr. 1 ch.	= 0.013	... 0.010	... 0.009
E. u. ch. pr. 1 lb. co.	= 8.37	... 10.42	... 11.13
E. u. ch. pr. 1 p. e.	= 79	... 99	... 105

En outre, on trouve que, dans cette machine, la détente qui produirait le maximum d'effet utile serait $l' = 0.35\, l$; c'est-à-dire qu'il faudrait intercepter la vapeur de la chaudière, après que le piston aurait parcouru 0.35 de sa course; et les effets maxima qu'on pourrait alors obtenir de la machine seraient les suivans.

Effets maxima de la machine avec sa détente la plus avantageuse et la vaporisation effective S = 0.301.

$\frac{l''}{l}$	= 0.35
v''	= 259
ar''	= 4340
$\frac{r''}{144}$	= 20.30
E. u.	= 1,125,000
E. u. ch.	= 34.09
E. u. 1 lb. co.	= 395,410
E. u. 1 p. e.	= 3,739,600

On voit par là qu'en se contentant, dans la machine, d'une détente de 0.317, on perd une force d'environ 2 chevaux sur son effet utile, et un effet d'environ 28,000 livres élevées à 1 pied, sur le produit de chaque livre de combustible; mais on y gagne une plus grande régularité dans le mouvement, qui peut être indispensable pour certains travaux industriels.

Les effets que nous venons d'obtenir sont ceux que produira la machine, si sa vaporisation est poussée avec une activité suffisante, et cette condition est ordinairement remplie quand la machine a sa charge complète; mais, s'il arrive qu'on lui im-

pose une moindre charge, il est clair que si l'on continuait de faire produire la même vaporisation dans la chaudière, le piston prendrait une vitesse plus considérable. Ainsi, pour se borner à la vitesse ordinaire, le machiniste réduira naturellement le feu du foyer, et, par conséquent, la vaporisation de la chaudière, jusqu'à ce que, malgré la diminution de charge, le nombre des coups de piston par minute ne dépasse pas celui que la machine donne ordinairement, et qui est convenable à son travail.

Supposons donc que, dans un cas semblable, la vaporisation brute ait été réduite à 0.243 pied cube par minute, la consommation de combustible variant en conséquence; ou qu'en tenant compte de la perte d'eau enlevée à l'état liquide avec la vapeur, on ait les données suivantes :

Vaporisation effective, S = 0.231 pied cube d'eau par minute.
Consommation de houille dans le même temps, 2.325 livres, ou N = 2.325.

Alors, les effets de la machine seront comme il suit.

Effets de la machine avec la détente 0.317 *et la vaporisation* S = 0.231.

			Maximum d'effet utile.
v	= 250	... 200	... 140.5
ar	= 1527	... 2870	... 5711
$\frac{r}{144}$	= 7.14	... 13.42	... 26.71
S	= 0.231	... 0.231	... 0.231
E. u.	= 381,750	... 574,000	... 802,660
E. u. ch.	= 11.57	... 17.40	... 24.32
E. u. 1 lb. co.	= 164,160	... 246,840	... 345,170

Tels seront donc, dans les différens cas supposés, les effets produits par la machine, pourvu toutefois qu'elle ne fasse aucune perte de vapeur, c'est-à-dire pourvu qu'elle soit en bon état. Comme, au moment des observations, cette condition n'était pas remplie dans la machine dont nous venons de donner les dimensions, et qu'elle laissait au contraire perdre par les tiroirs une quantité considérable de vapeur, qu'on reconnaissait en ouvant le robinet de décharge du cylindre pendant la clôture des tiroirs, mais qu'on ne pouvait évaluer avec assez de précision pour en conclure la vaporisation *effective* de la machine, nous nous contentons de rapporter ici les résultats des formules, sans chercher à les comparer à ceux de l'expérience.

Si le calcul se fait en mesures françaises, on aura, pour les constantes, les valeurs suivantes :

Frottement de la machine sans charge, en kilogrammes par mètre carré de la surface du

piston, pour un cylindre dont le diamètre, exprimé en pieds, est représenté par d,

$$f = \frac{450}{d}.$$

Frottement additionnel de la machine par unité de la résistance, $\frac{1}{7}$ de cette résistance, ou $\delta = 0.14$.

Pression atmosphérique, $p = 10333$ kilogrammes par mètre carré.

Liberté du cylindre, $\frac{1}{20}$ de la course, ou $c = 0.05l$.

$$m = 21{,}232{,}000,$$
$$n = 3020.$$

En admettant donc ces valeurs, et se rappelant la valeur de la quantité k, qui est

$$k = \frac{l'}{l'+c} + \log \frac{l+c}{l'+c},$$

on obtiendra les formules suivantes.

Formules pratiques pour les machines d'Evans (mesures françaises).

CAS D'UNE CHARGE OU D'UNE VITESSE QUELCONQUES, AVEC UNE DÉTENTE DONNÉE.

$$v = \frac{kS}{a} \cdot \frac{21{,}232{,}000}{13{,}353 + (1+\delta)r + f}$$ . . . . Vitesse du piston, en mètres, par minute.

$$ar = 21{,}232{,}000 \frac{kS}{(1+\delta)v} - \frac{a}{(1+\delta)}(13{,}353 + f).$$ Charge utile du piston, en kilogrammes.

$$S = \frac{av}{k} \cdot \frac{13{,}353 + (1+\delta)r + f}{21{,}232{,}000}$$ . . . . . Vaporisation effective, en mètres cubes d'eau, par minute.

$$\text{E. u.} = arv$$ . . . . Effet utile, en kilogrammes élevés à 1 mètre, par minute.

$$\text{E. u. ch.} = \frac{arv}{4500}$$ . . . . Effet utile, en chevaux.

$$\text{E. u. 1 k. co.} = \frac{arv}{N}$$ . . . . Effet utile de 1 kilogramme de combustible, en kil. élevés à 1 mètre.

$$\text{E. u. 1 m. e.} = \frac{arv}{S}$$ . . . . Effet utile de 1 mètre cube d'eau, en kilogrammes élevés à 1 mètre.

$$\text{Q. co. pr. 1 ch.} = \frac{4500\,N}{arv}$$ . . . . Quantité de combustible, en kilog., qui produit l'effet d'un cheval.

$$\text{Q. e. pr. 1 ch.} = \frac{4500\,S}{arv}$$ . . . . Quantité d'eau, en mètres cubes, qui produit l'effet d'un cheval.

$$\text{E. u. ch. pr. 1 k. co.} = \frac{arv}{4500\,N}$$ . . . . Effet utile, en chevaux, produit par kilogramme de combustible.

$$\text{E. u. ch. pr. 1 m. e.} = \frac{arv}{4500\,S}$$ . . . . Effet utile, en chevaux, produit par mètre cube d'eau vaporisé.

CAS DU MAXIMUM D'EFFET UTILE, AVEC UNE DÉTENTE DONNÉE.

$$v' = \frac{l}{l+c'} \cdot \frac{S}{a} \cdot \frac{21{,}232{,}000}{3020 + P} \ldots\ldots$$ Vitesse du piston, en mètres, par minute.

$$ar' = \frac{a}{1+\delta} \cdot \frac{l'+c}{l} k(3020 + P) - \frac{a}{1+\delta}(13{,}333 + f).$$

Charge utile du piston, en kilogr.

$$S = \frac{l'+c}{l} \cdot av' \frac{3020 + P}{21{,}232{,}000} \ldots\ldots$$ Vaporisation effective, en mètres cubes d'eau, par minute.

$$\text{E. u. max.} = ar'v' \ldots\ldots$$ Effet utile maximum, en kilogramm. élevés à 1 mètre, par minute.

CAS DU MAXIMUM ABSOLU D'EFFET UTILE.

$$\frac{l'}{l} = \frac{13{,}333 + f}{3020 + P} \ldots\ldots$$ Détente qui produit le maximum absolu d'effet utile.

Si l'on veut soumettre au calcul la machine dont nous avons donné plus haut les proportions en mesures anglaises, on aura :

Diamètre du cylindre, 41.91 centimètres, ou $a = 0.1380$ mètre carré.

Course du piston, 0.914 mètre, ou $l = 0.914$.

Détente de la vapeur, commençant à 0.517 de la course du piston, ou $\frac{l'}{l} = 0.517$.

Vaporisation brute, 0.008966 mètre cube, par minute, ou vaporisation effective, $S = 0.008518$.

Consommation de houille dans le même temps, 1.290 kilogramme, ou $N = 1.290$.

Avec ces données, les effets de la machine seront les suivans.

Effets de la machine avec la détente 0.517 *et la vaporisation effective* 0.00852 *mètre cube.*

v . . . . =	76.2	. . . 61	. . . 55.77
ar . . . . =	1436	. . . 2218	. . . 2589
$\frac{r}{10{,}000}$ . . . . =	1.041	. . . 1.608	. . . 1.877
S . . . . =	0.00852	. . . 0.00852	. . . 0.00852
E. u. . . . . =	109,130	. . . 135,210	. . . 144,410
E. u. ch. . . . . =	24	. . . 30	. . . 32
E. u. 1 k. co. . . . . =	84,606	. . . 104,820	. . . 111,950
E. u. 1 m. e. . . . . . =	12,813,000	. . . 15,874,000	. . . 16,954,400
Q. co. pr. 1 ch. . . . =	0.055	. . . 0.043	. . . 0.040
Q. e. pr. 1 ch. . . . . =	0.00035	. . . 0.00028	. . . 0.00027
E. u. ch. pr. 1 k. co. =	18.80	. . . 23.29	. . . 24.88
E. u. ch. pr. 1 m. e. =	2847	. . . 3526	. . . 3768

CHAPITRE XI.

MACHINES DE WATT A SIMPLE ACTION,

OU

MACHINES A SIMPLE ACTION, A BASSE PRESSION, A DÉTENTE ET A CONDENSATION.

ARTICLE I.

DESCRIPTION DE LA MACHINE.

Les machines de Watt à simple action sont des machines *à simple action*, *à basse pression*, *à détente et à condensation*.

Dans ces machines, l'effort de la vapeur est appliqué uniquement sur la face supérieure du piston, et l'action de la machine pour élever l'eau dans les pompes d'épuisement, ou pour produire l'effet utile, ne s'exerce que pendant la course descendante du piston. C'est ce qui a fait donner à ces machines le nom de machines à simple action. La vapeur se forme d'ailleurs dans la chaudière sous une pression d'environ 1.1 atmosphère.

La communication étant d'abord ouverte entre la chaudière et la partie supérieure du cylindre, d'une part, et entre la partie inférieure du cylindre et le condenseur, d'autre part, la vapeur de la chaudière arrive dans le cylindre et presse avec toute sa force au-dessus du piston, tandis qu'au-dessous, la vapeur qui a servi à la course antérieure se trouve condensée. Le piston commence donc sa course descendante. Après qu'il en a parcouru une certaine portion, la communication de la chaudière au cylindre est interceptée. Le piston poursuit néanmoins encore son mouvement, et achève sa course, par l'effet de la détente de la vapeur qui a pénétré jusqu'alors dans le cylindre. Mais, quand il est parvenu au bas du cylindre, la soupape d'éduction de la vapeur se ferme, et une soupape, nommée soupape d'équilibre, établit, en s'ouvrant, une libre communication entre les deux portions, supérieure et inférieure, du cylindre. Alors la vapeur se répand des deux côtés du piston, et celui-ci se trouve en équilibre dans la vapeur, c'est-à-dire pressé également sur ses deux faces. Il y a par conséquent cessation totale dans l'action de la force motrice.

D'un autre côté, pendant la course qui vient de s'opérer, un contre-poids, suspendu à l'extrémité opposée du balancier, a été élevé en même temps que la charge. Il tend maintenant à redescendre par l'effet de son poids, et, par conséquent, à faire remonter le piston dans le cylindre. Le piston, d'ailleurs, ne porte plus aucune charge qui puisse s'opposer à ce mouvement, puisque l'action de la pompe d'épuisement ou de la charge de la machine ne s'exerce que quand le piston tend à descendre, et qu'en ce moment il tend, au contraire, à remonter. Il n'y a donc que le frottement propre de la machine, augmenté quelquefois du travail peu important de quelque pompe secondaire, qui fasse résistance à l'effort du contre-poids ; mais, comme on donne à celui-ci un poids suffisant pour qu'il puisse surmonter cette résistance, il s'ensuit que le piston est enlevé et ramené au sommet du cylindre.

Ainsi les choses se trouvent replacées au même état qu'à l'origine, et l'action de la vapeur recommence, pour faire exécuter au piston une nouvelle course descendante.

La *pl. XIX* représente une très-belle machine de ce système, de la construction la plus perfectionnée, et sortie des ateliers bien connus de MM. Hick de Bolton (Lancashire).

Le cylindre à vapeur est représenté en C ; il est parcouru par un piston à garniture de chanvre. En avant du cylindre sont deux colonnes B', B', qui, sur la *fig.* 87, se projettent en une seule, mais qui sont vues séparément dans la *fig.* 90. Ces colonnes forment la communication du sommet au bas du cylindre, et l'entablement et le soubassement qui les unissent forment les boîtes à vapeur. Dans la boîte supérieure (*fig.* 90) sont contenues deux soupapes. La soupape *aa* est la soupape d'admission ; elle reçoit la vapeur de la chaudière par le tube à vapeur S, et la laisse pénétrer dans la partie supérieure du cylindre. La soupape *bb* est la soupape d'équilibre; elle sert à laisser la vapeur se répandre également sur les deux faces du piston. Enfin, la soupape *ee*, contenue dans le soubassement des colonnes, est la soupape d'éduction ; elle sert à laisser sortir la vapeur du cylindre pour se rendre au condenseur, après qu'elle a terminé son action dans la machine. Ces trois soupapes sont *à double disque*, c'est-à-dire qu'elles sont formées de deux disques montés sur une même tige, et qui tendent à admettre la vapeur, l'un par sa face supérieure, l'autre par sa face inférieure, comme on le reconnait en examinant plus particulièrement les *fig.* 87 et 88, où la soupape d'éduction *ee* est représentée ouverte. Lorsque ces soupapes sont fermées, elles reçoivent la pression de la vapeur dans les deux sens, et, par conséquent, on peut, suivant les diamètres respectifs des deux disques dont elles se composent, faire en sorte qu'elles n'exigent qu'un effort très-faible pour les soulever, ce qui est un avantage considérable dans les grandes machines.

Ainsi que nous venons de le dire, la vapeur arrive de la chaudière par le tube à vapeur S. Ce tube est intercepté par une soupape à gorge qui sert à régler la quantité de vapeur qu'on veut laisser pénétrer dans le cylindre en un temps donné. C'est, comme nous l'avons expliqué en détail, chap. III, § VII, un disque *s* mobile sur

son axe, et qui, selon qu'il est plus ou moins tourné, peut intercepter, soit totalement, soit en partie, le passage de la vapeur. Comme les machines à simple action n'ont pas de gouverneur à force centrifuge, attendu qu'elles ne sont pas rotatives, la soupape à gorge se règle à la main, et cette opération s'exécute au moyen de la roue *s'*, laquelle fait mouvoir l'axe vertical *s''*, terminé par une vis de rappel qui agit sur la tige de la soupape.

La vapeur, une fois admise dans la boite à vapeur, la remplit en entier, mais ne peut agir dans la machine que quand la soupape d'admission *a* est ouverte : alors la vapeur pénètre dans la partie supérieure du cylindre par le port 1 (*fig.* 87 et 90). Dans le même instant, d'après la disposition de la machine, la soupape d'éduction *e* est toujours ouverte, de sorte que la vapeur qui occupait le dessous du piston s'écoule vers le condenseur, où elle est réduite à l'état liquide. Le piston, pressé en-dessus par la vapeur de la chaudière, et n'éprouvant en-dessous que la pression très-faible de la vapeur imparfaitement condensée, commence donc sa course descendante. Quand il en a parcouru une certaine portion, la soupape d'admission *a* se ferme, mais le piston continue son mouvement par la pression décroissante de la vapeur admise jusque-là dans le cylindre, et il parvient ainsi au bas de sa course. Pendant cette dernière portion de la course du piston, la soupape d'éduction *e* continue de rester ouverte; mais, une fois que le piston est parvenu au fond du cylindre, cette soupape se ferme à son tour. Alors la soupape d'équilibre *b* se soulève par l'action de la machine; la vapeur qui occupait la partie supérieure du cylindre en sort donc par le port 1, passe dans les deux colonnes d'équilibre B', B', et pénètre en-dessous du piston par le port 2 (*fig.* 87 et 90). Dès ce moment, le piston se trouve pressé également sur ses deux faces. Par conséquent, le contre-poids suspendu à l'extrémité opposée du grand balancier, ou la maîtresse tige des pompes ZZ, qui avait été soulevée par l'action de la vapeur dans la course descendante du piston, retombe par son poids, et le piston se trouve ramené au sommet du cylindre. Ainsi, tout se trouve replacé comme à l'instant du départ, et il suffit de rouvrir les soupapes d'admission et d'éduction, pour faire fournir à la machine une nouvelle course descendante. La soupape à gorge qu'on voit en *z* (*fig.* 90) sert à régler le passage de la vapeur, de la face supérieure à la face inférieure du piston, et, par conséquent, à modérer la vitesse de la course remontante du piston à vapeur, sous l'action du contre-poids Z. Elle se manœuvre à la main de la même manière que la soupape *s*, dont il a déjà été parlé.

L'ouverture et la clôture des soupapes s'exécutent par la machine elle-même, au moyen d'un encliquetage, qu'on voit représenté sur une plus grande échelle dans les *fig.* 88 et 89. La seconde de ces figures ne contient que les pièces qui produisent l'action de la soupape d'équilibre; la première contient plus spécialement celles qui font mouvoir les soupapes d'admission et d'éduction. Nous les expliquerons avant d'aller plus loin.

Entre deux montans verticaux M, sont fixés trois axes horizontaux. Celui du bas, n, gouverne les soupapes d'admission et d'éduction; celui du haut, p, gouverne la soupape d'équilibre, et enfin celui du milieu, o, porte les cliquets qui dégagent en temps opportun les contre-poids de chacun des axes précédens, comme on va le voir dans un instant. L'axe n porte cinq petits leviers et un grand, que l'on reconnait aisément sur la *fig.* 88, et que nous prendrons successivement. Le premier levier, e', communique à la soupape d'éduction par un système de leviers de renvoi, dont l'effet est de fermer ou d'ouvrir cette soupape, suivant le mouvement donné à l'axe. Le second, e'', porte une longue tringle à-peu-près verticale qui soutient un contre-poids E'', dont la chute détermine l'ouverture de la soupape d'éduction, comme on le voit représenté sur la figure. Ce contre-poids est retenu par une courroie d'arrêt, afin d'empêcher que la soupape ne s'ouvre au-delà du degré nécessaire. Le troisième, e''', communique à la soupape d'admission, au moyen de la tringle $e'''m$, et sert à ouvrir cette soupape en même temps que celle d'éduction, quand le piston doit fournir une course descendante. Le quatrième est une came qui, lorsqu'elle est accrochée par le cliquet i', qu'on voit placé au-dessus, retient l'axe, et, par conséquent, tient la soupape e fermée, malgré l'effort du contre-poids E'', qui tend à l'ouvrir. Le grand levier E sert à tourner l'axe en sens contraire du contre-poids; et enfin le dernier levier f communique à la soupape d'injection du condenseur, et nous en parlerons plus loin. D'après cette disposition, on voit que si l'on appuie sur le grand levier, ou levier à manche E, on fera tourner l'axe n: alors la soupape d'éduction se fermera, le contre-poids E'' se relèvera, et la came, s'engageant dans le cliquet i', retiendra l'axe et la soupape dans cette position; mais si ensuite on soulève la tringle verticale $i'\ i'$, le cliquet se dégagera, et le contre-poids E'' en tombant, ouvrira la soupape d'éduction.

L'axe p gouverne la soupape d'équilibre (*fig.* 87, 88 et 89). Il porte deux petits leviers, un levier à manche et une came. Le levier b' communique à la soupape d'équilibre, et sert à ouvrir ou fermer cette soupape, au moyen des leviers de renvoi qui sont représentés sur la *fig.* 89; le levier b'' supporte un contre-poids B'', qui, en tombant, ouvre la soupape d'équilibre; le levier à manche B sert à faire tourner l'axe en sens contraire du contre-poids; et enfin la came sert à tenir le contre-poids soulevé et la soupape fermée pendant tout le temps qu'elle est retenue par le cliquet b'''. On voit, d'après cette disposition, que si l'on soulève la tringle verticale $i''\ i''$, ce qui fait tourner le petit levier coudé $i''\ ob'''$ autour de l'axe o, le cliquet se trouve dégagé, le contre-poids B'' entraine l'axe, et la soupape d'équilibre s'ouvre aussitôt. Puis, si l'on relève le levier à manche B, le contre-poids remonte, la soupape se ferme, et la came, s'engageant dans le cliquet, retient l'axe et la soupape dans la même position. Il faut, du reste, remarquer que les deux cliquets i' et b''' sont montés sur le même axe o, mais sont indépendans l'un de l'autre.

D'après l'arrangement de l'encliquetage qu'on vient de décrire, on doit observer

que les soupapes sont toujours fermées par l'action des leviers à manche A, E, B, et qu'elles sont toujours ouvertes au contraire par la levée des cliquets, ou des tringles i' et i''. Pour faire comprendre l'opération complète de la machine, il suffit donc d'expliquer maintenant comment les leviers à manche sont levés ou baissés, à la fin de chaque course du piston, par des taquets fixés à l'une des tiges mouvantes de la machine, et comment les cliquets sont dégagés ensuite par l'action d'une cataracte semblable à celles que nous avons déjà décrites.

Supposons le piston à vapeur au sommet du cylindre, comme il y est toujours ramené pendant les interruptions du travail par la prépondérance du contre-poids ou de la maîtresse tige des pompes. Si le machiniste veut mettre la machine en mouvement, il ouvre à la fois la soupape d'admission a et la soupape d'éduction e (*fig.* 87 et 88) : alors le piston, pressé par la vapeur de la chaudière, commence à descendre dans le cylindre; et, par conséquent, la tige T de la pompe d'eau chaude, qui est suspendue au grand balancier de la machine, descend en même temps. Quand le piston a parcouru environ moitié de sa course, le taquet α, fixé sur la tige T, rencontre le levier à manche A de la soupape d'admission. Ce levier ne forme, avec la petite branche ma', qu'une seule pièce, ou levier coudé A ma', mobile autour du petit axe m. Ainsi, la descente du taquet α, en pressant sur la branche A, fait tourner ce levier autour de m; dans cette action, l'encoche a' abandonne le boulon d'embrayage a'' de la soupape d'admission, et, par conséquent, cette soupape, sollicitée par son poids et par l'excès de pression de la vapeur sur son disque supérieur, retombe sur son siége et ferme le passage. Pour que sa chute ne soit pas trop violente, un disque inférieur A'' est suspendu au bas d'une longue tringle verticale attachée au levier a'' de la soupape, et ce disque se meut dans un tube rempli d'eau, de sorte que la résistance de l'eau s'oppose à ce que la soupape puisse prendre des mouvemens trop brusques. On remarquera qu'après que le levier Ama' a été baissé par le taquet α, celui-ci continue son mouvement sans aucun autre effet, parce que la forme coudée de la branche A permet au taquet de passer sans lui faire obstacle. A compter du moment que la soupape d'admission est fermée, le piston ne continue plus son mouvement que par la détente de la vapeur admise jusque-là dans le cylindre; ainsi, en réglant par tâtonnement, au moyen de la soupape à gorge s (*fig.* 90), la quantité de vapeur qui arrive de la chaudière à la machine, on peut en admettre assez pour que le piston soit conduit, par la détente de cette vapeur, juste au point où doit se terminer sa course, sans s'arrêter auparavant.

Pendant toute l'admission et la détente de la vapeur, la soupape d'éduction e continue de rester ouverte, pour laisser sortir la vapeur inutile de dessous le piston. Mais, un moment avant que le piston n'atteigne le fond du cylindre, le taquet ε, fixé à la tige T, rencontre le levier à manche E, et le fait baisser. Dans cette action, il tourne l'axe n, ferme la soupape d'éduction, relève son contre-poids E'', accroche son cliquet i'; et enfin, en relevant la tringle $e'''m$, ramène l'encoche a'

en face du boulon d'embrayage a''. Il résulte de cette dernière circonstance que, sitôt que la tige T s'est relevée suffisamment, ce qui a lieu pendant la course remontante du piston, le levier coudé $Am\alpha'$, abandonné par le taquet α, et entraîné par son contre-poids m', retombe sur le boulon a''; celui-ci entre dans l'encoche a', et ainsi la tringle $e'''a''$ se trouve de nouveau embrayée sur la soupape d'admission.

On vient de voir qu'au moment où le piston à vapeur arrive à la fin de sa course descendante, l'action de la vapeur se trouve épuisée, et le piston s'arrête. Mais bientôt la cataracte, dont nous expliquerons l'action un peu plus loin, soulève la tringle $i''i''$ (*fig.* 87 88 et 89). Alors l'axe p, entraîné par son contre-poids B'', tourne sur lui-même, la soupape d'équilibre s'ouvre, et la vapeur passe librement du dessus au-dessous du piston. Par conséquent le piston, entraîné par la prépondérance de la maîtresse tige des pompes, remonte dans le cylindre, et la tige T remonte en même temps. Lorsque le piston est près d'arriver au sommet de sa course, le taquet ε, fixé à la tige T, rencontre le levier B, qui avait été baissé par l'ouverture de la soupape d'équilibre; il le relève, et, dans cette action, il ferme la soupape d'équilibre, relève son contre-poids et accroche le cliquet b''', qui retient l'axe dans cette position. Puis, quand le piston est près de toucher le sommet du cylindre, la traverse k, fixée à l'extrémité du balancier K de la machine, rencontre les deux poutrelles élastiques, ou gardes $k'k$ (*fig.* 87), qui empêchent le balancier de continuer son mouvement. Le piston s'arrête donc de nouveau, et la machine reste en repos jusqu'à ce que les soupapes d'admission et d'éduction soient ouvertes par la cataracte. La soupape à gorge z (*fig.* 90) sert à régler le passage de la vapeur d'une face à l'autre du piston, et, par conséquent, à empêcher que le piston ne remonte dans le cylindre avec trop de vitesse, ce qui produirait à la fin de la course un choc trop violent de la traverse k contre les gardes.

Le piston, étant ainsi ramené au sommet du cylindre, y reste en repos, puisque toutes les soupapes sont alors fermées. Cependant, après un certain intervalle de temps, la cataracte soulève la tringle $i'i'$; par conséquent, le cliquet i' se trouve décroché, le contre-poids E'' tombe, l'axe n tourne et les deux soupapes d'admission et d'éduction sont ouvertes en même temps. La machine fournit donc une nouvelle course descendante, et ainsi de suite.

D'après ce qui précède, on conçoit facilement toute l'opération de la machine, et il ne reste plus à expliquer que les effets de la cataracte sur les tringles i' et i'', pour produire l'ouverture des deux soupapes d'admission et d'éduction à la suite de la course montante, et l'ouverture de la soupape d'équilibre à la suite de la course descendante.

La cataracte est représentée en D (*fig.* 87), et les détails que nous avons déjà donnés sur cette espèce d'appareil, chap. III, § VIII, en faciliteront l'intelligence. Elle consiste en un petit récipient hermétiquement fermé et plongé dans une bâche pleine d'eau. Ce récipient porte deux soupapes : l'une inférieure et s'ouvrant au-dedans, l'autre supérieure et s'ouvrant au-dehors, comme on le voit sur la figure.

En outre, au récipient est fixé un petit corps de pompe parcouru par un plongeur d, dont la tige est susceptible de recevoir deux mouvemens, selon celui des deux contre-poids d' ou d'' qui agit sur elle. Quand le piston à vapeur de la machine remonte dans son cylindre, le taquet s, fixé à la tige T, soulève le contre-poids d'', et le retient dans cette position : alors le contre-poids d' a sa pleine action sur la cataracte. En retombant par son poids, il relève le plongeur d, soulève la soupape inférieure, et la cataracte se remplit d'eau. Ensuite, quand la tige T redescend, le contre-poids d'' se trouve abandonné à lui-même. En appuyant sur le plongeur, il le force de redescendre le corps de pompe, et relève le contre-poids d', qui est le moins pesant; ainsi l'eau contenue dans le petit récipient s'en échappe en soulevant la soupape supérieure. Mais, comme le temps nécessaire à l'entrée et à la sortie de l'eau déplacée par le plongeur dépend de la hauteur dont chaque soupape peut se soulever, et que cette hauteur est elle-même réglée par une tige à filets de vis et un écrou de rappel r' ou r'', on comprend facilement qu'on peut faire durer la levée et la descente du plongeur aussi longtemps qu'on le desire.

Cela posé, si l'on revient aux soupapes qui règlent le mouvement de la vapeur, il sera facile de voir comment elles sont ouvertes, par la cataracte, à des intervalles de temps déterminés. En effet, en reprenant la machine quand le piston vient d'être ramené au sommet du cylindre par la prépondérance du contre-poids, on reconnaît que, pendant le mouvement ascendant du piston à vapeur, le taquet s, fixé à la tige T, a relevé le contre-poids d'' de la cataracte, de sorte que le contre-poids d' a commencé à exercer son action pour faire remonter le plongeur. Comme l'ouverture limitée de la soupape inférieure de la cataracte ne laisse entrer l'eau que peu-à-peu dans le récipient, le plongeur ne remonte que très-lentement, et, pendant tout ce temps, la machine continue de rester en repos. Mais, quand enfin le plongeur est remonté suffisamment, on voit, d'après la disposition des leviers de renvoi i, i (*fig.* 87), que la tringle verticale $i' i'$ se trouve soulevée. Ainsi, le cliquet i', qui retient l'axe n, se décroche, et les deux soupapes d'admission et d'éduction s'ouvrent aussitôt.

La machine fournit donc sa course descendante ; puis le piston s'arrête de nouveau. Mais, sitôt que la tige T a commencé à descendre, le contre-poids d'' de la cataracte s'est trouvé abandonné à lui-même, et il a commencé à faire descendre le plongeur. Ainsi, après un certain temps, le plongeur parvient au bas de sa course ; alors, les leviers de renvoi soulèvent la tringle $i'' i''$; celle-ci décroche le cliquet b''', qui retient l'axe p, et, par conséquent, la soupape d'équilibre s'ouvre immédiatement. Pour que les mouvemens du plongeur n'aient action sur les cliquets qu'au moment convenable, les deux tringles i' et i'' sont terminées par deux boucles qui permettent aux leviers de la cataracte d'exécuter une partie de leur mouvement sans soulever les cliquets, c'est-à-dire sans agir sur la soupape.

La vapeur, en sortant du cylindre, est conduite au condenseur F (*fig* 87), qui n'est vu que partiellement dans la figure. C'est, comme on l'a expliqué chap.

III, § VI, un vase hermétiquement fermé, plongé dans une bâche d'eau froide F', et dans lequel on peut laisser pénétrer, au moyen du robinet d'injection F'', un jet d'eau froide qui condense la vapeur à mesure de son arrivée. La quantité d'eau lancée dans le condenseur dépend de l'ouverture du robinet F'', et celle-ci est elle-même réglée au moyen de la poignée F''', qui se trouve à la portée du machiniste. Mais, pour que le condenseur ne soit pas exposé à se remplir d'eau pendant les instans de repos de la machine, l'injection de l'eau ne s'y exécute que pendant les courses descendantes du piston, c'est-à-dire quand la soupape d'éduction est ouverte, et qu'il y a de la vapeur à condenser. A cet effet, l'entrée du tube d'injection est fermée par une soupape conique *f'*, et celle-ci est liée par des tiges et des leviers de renvoi au petit levier *f*, fixé à l'axe *n*, qui gouverne la soupape d'éduction; de sorte que, dès que celle-ci est fermée, la soupape d'injection l'est également, et il cesse d'arriver de l'eau dans le condenseur.

L'eau amassée au fond du condenseur en est ensuite enlevée par la pompe d'air qu'on voit figurée en L, et qui est de la construction expliquée chap. III, § VI. Quand le piston *l* de cette pompe remonte dans son corps de pompe, il aspire, par les clapets de pied *l'*, *l'*, l'eau et les gaz amassés dans le condenseur; quand il redescend, cette eau et ces gaz soulèvent les clapets *l''*, *l''*, et passent au-dessus du piston; et enfin, quand le piston remonte de nouveau, cette eau, comprimée dans la partie supérieure du corps de pompe, soulève le clapet de décharge *l'''*, et passe dans le réservoir d'eau chaude qu'on voit représenté en G.

Enfin, l'eau ainsi amassée dans le réservoir d'eau chaude y est puisée par la pompe d'eau chaude H, qui la fait passer à la chaudière. C'est une pompe foulante ordinaire, mise en action par la tige T, suspendue au grand balancier de la machine. Quand son plongeur *h* remonte, il aspire l'eau du réservoir d'eau chaude par la soupape inférieure *h'*; et, quand il redescend, il force cette eau de soulever la soupape supérieure *h''*, et de se rendre à la chaudière par le tuyau d'alimentation *h'''*, comme nous l'avons expliqué chap. III, § VI.

La machine n'a pas de pompe d'eau froide, parce que celle-ci est fournie par le travail même de la machine, qui est une machine d'épuisement. Cet épuisement est exécuté pendant les courses descendantes du piston à vapeur, par l'action des pompes élévatoires contenues dans le puits Y, lesquelles sont mises en jeu par l'intermédiaire de la maîtresse tige ZZ.

Pour que les quatre tiges du piston à vapeur, de la pompe d'eau chaude, de la pompe d'air et des pompes d'épuisement, soient exactement maintenues dans la direction verticale de leur mouvement, elles sont guidées par deux parallélogrammes *uu'u''u'''* et *xx'x''x'''*, dont nous avons expliqué les effets et la construction, chap. III, § V.

Enfin, la machine a deux chaudières, dont une suffit à la production de vapeur nécessaire, et l'autre est en réserve pour permettre les réparations. Elles sont de

la forme dite *wagon*, décrite chap. III, § I; et, pour les dimensions de la machine décrite, savoir : une course de 8 pieds et un diamètre du cylindre de 5.5 pieds, elles ont 23 pieds de longueur sur 6 de largeur, à la surface de l'eau.

ARTICLE II.

THÉORIE DE LA MACHINE DE WATT A SIMPLE ACTION.

§ I. *Du règlement de la machine.*

Dans les machines à double action, que nous avons étudiées jusqu'ici, la vitesse du mouvement est réglée, comme nous l'avons vu, d'abord par la vaporisation de la chaudière, et secondairement par l'emploi de la soupape à gorge et du gouverneur. En outre, dans ces machines, l'étendue de la course du piston dans le cylindre se trouve fixée d'une manière invariable par la manivelle de l'arbre du volant, de sorte que la machine n'exige à cet égard aucun règlement. Mais, il n'en est pas de même des machines à simple action : d'abord le gouverneur n'y est pas applicable, puisque l'emploi de cet appareil exige un mouvement rotatif et continu; ensuite, les machines à simple action n'ayant point de manivelle se trouvent exposées, soit à ce que le piston s'arrête dans le cylindre avant d'avoir parcouru tout l'espace fixé pour sa course, ce qui réduit d'autant l'effet de la machine, soit au contraire à ce que le piston dépasse le point voulu et vienne frapper le fond du cylindre, ce qui met la machine en danger. Il est donc nécessaire d'expliquer, avant d'aller plus loin, comment on obtient, dans ces machines, le règlement nécessaire à leur action, savoir : d'abord, 1°. la fixation du mouvement à la vitesse voulue; 2°. le règlement de la course descendante du piston, et 3°. le règlement de la course montante.

1°. Le règlement de la vitesse de la machine, ou le nombre des courses du piston par minute, s'obtient au moyen de la cataracte dont nous avons déjà expliqué les effets, chap. III, § VIII, et qui revient en réalité à limiter la vaporisation de la chaudière au degré convenable à la vitesse prescrite. Ce règlement peut aussi s'obtenir, sans cataracte, en augmentant ou diminuant la prépondérance de la maîtresse tige, ou le contre-poids de la machine, pour faire exécuter, plus ou moins rapidement, la course remontante, puis augmentant ou diminuant en même temps la vaporisation de la chaudière, afin d'augmenter d'une manière correspondante la vitesse de la course descendante du piston, et alors la machine travaille d'une manière continue et sans s'arrêter à la fin de chaque course : mais ce moyen, employé à l'origine de ces machines, est beaucoup moins précis que la cataracte.

2°. Le règlement de la course descendante du piston, c'est-à-dire l'exactitude du piston à parcourir sa course tout entière sans la dépasser ni s'arrêter auparavant,

s'obtient, soit par l'emploi d'une soupape à gorge ou d'une soupape régulatrice, soit par la variation de la détente de la machine.

L'effet de l'ouverture plus ou moins grande de la soupape à gorge ou de la soupape régulatrice étant de limiter la masse de vapeur qui peut passer de la chaudière au cylindre par minute, ou par coup de piston, puisque le nombre de ceux-ci, par minute, est fixé par la cataracte, on conçoit facilement que ces appareils doivent produire le règlement desiré ; car, si une moindre masse de vapeur est reçue à chaque course dans la même capacité du cylindre, cette vapeur, en s'y répandant, y prendra une pression plus faible, et, par conséquent, sa détente sera capable de pousser le piston moins loin dans le cylindre. Donc la course du piston se trouvera diminuée d'autant. D'un autre côté, il est évident que, si la masse de vapeur dépensée par le cylindre devient moindre, sa production dans la chaudière deviendra moindre aussi, puisque le chauffeur ne manquera pas de réduire le feu en proportion. Ainsi, ce moyen revient, en définitive, à régler la vaporisation de la chaudière, de manière que, répartie sur le nombre des courses fixées par la cataracte, elle fournisse à chacune la masse de vapeur qui convient à son exécution complète.

La variation de la détente ou du point d'intersection de la vapeur peut encore produire l'effet desiré ; car, si la vapeur est interceptée après une moindre portion de la course parcourue, il est clair qu'il y aura une moindre masse de vapeur admise à chaque course dans le cylindre. Par conséquent, on retombera dans le cas précédent, c'est-à-dire que cette masse de vapeur, en se détendant, conduira le piston à une moindre distance dans le cylindre, et l'inverse aura lieu dans le cas contraire. Si ce moyen de règlement n'est employé que momentanément et dans un cas accidentel, il s'exécute aux dépens de la réserve de vapeur dans la chaudière ; car, c'est cette réserve qui doit fournir le surplus de dépense, ou qui doit, au contraire, recueillir l'économie de vapeur qui se fait par suite du changement dans la longueur du cylindre qu'on laisse se remplir de la vapeur. Dans ce cas, la vaporisation de la chaudière reste la même ; mais aussi, la variation de détente n'est qu'une légère irrégularité dans l'action de la machine, et, après le petit nombre de coups de piston où cet effet s'est trouvé nécessaire, on rétablit la détente au premier point, et rien n'est changé dans le travail de la machine. Si, au contraire, le changement du point d'intersection de la vapeur est un fait permanent, alors il est clair qu'il doit être accompagné d'un changement correspondant dans la vaporisation de la chaudière ; car, s'il se dépensait moins de vapeur, et que la chaudière continuât d'en fournir autant, il faudrait nécessairement que le reste se perdît par les soupapes de sûreté, ce que certainement le machiniste ne permettrait pas ; et si, au contraire, il s'en dépensait plus et que la production de la chaudière ne suivît pas le même accroissement, la machine serait bientôt arrêtée, faute de vapeur. On voit donc par là que le règlement de la machine par l'intersection de la vapeur revient, en définitive, à un changement de vaporisation, à moins qu'il ne soit un fait transitoire et négligeable dans l'effet total de la machine.

On conçoit d'ailleurs que ces deux règlemens s'exécutent bien facilement par tâtonnemens dans la pratique. En effet, pour la soupape à gorge, il suffit de la fermer trop d'abord, puis de l'ouvrir peu-à-peu, jusqu'à ce qu'on s'aperçoive que l'effet désiré est obtenu. Il en est de même pour le règlement du point d'intersection de la vapeur. On admet d'abord avec précaution une petite quantité de vapeur dans le cylindre; puis on l'augmente de plus en plus en changeant le taquet de clôture de la soupape d'admission sur la tige qui le porte, jusqu'à ce qu'on voie que le piston atteint précisément le point marqué pour la fin de sa course; et si l'on trouve que le piston dépasse ce point, et que le balancier vient, en conséquence, frapper les ressorts ou gardes qui protégent le fond du cylindre contre les chocs du piston, c'est une preuve que la quantité de vapeur admise est trop grande, et on la réduit, en conséquence, jusqu'à ce qu'on ait obtenu le règlement voulu.

3°. Pour régler la course montante du piston, on donne à la machine une prépondérance du côté de la maitresse tige, ou un *contre-poids* capable seulement de faire remonter le piston dans le cylindre sans produire de choc important du balancier contre les gardes; et chaque fois que la charge de la machine change d'une manière permanente, on augmente ou l'on diminue cette prépondérance, en ajoutant des poids dans un sens ou dans l'autre. Mais s'il arrive que la charge subisse quelque variation temporaire, on règle le mouvement sans toucher au contre-poids, en ouvrant ou fermant convenablement la soupape à gorge, qui permet le passage de la vapeur d'une face à l'autre du piston.

On peut encore régler la course montante sans altérer le contre-poids, en changeant le point de clôture de la soupape d'équilibre, ce qui se fait en déplaçant le taquet de clôture de cette soupape sur la tige de suspension. En effet, comme le piston ne remonte librement dans le cylindre que parce que la soupape d'équilibre permet à la vapeur qui se trouve dans la partie supérieure du cylindre de passer dans la partie inférieure et de faire place au piston, en refermant cette soupape d'équilibre un peu plus tôt, on crée par là un nouvel obstacle contre le piston. Comme celui-ci, après la clôture de la soupape, continue encore quelque temps son mouvement en vertu de sa vitesse acquise et de l'effort du contre-poids, la vapeur qui est située dans la partie inférieure du cylindre se dilate à mesure que la progression du piston lui abandonne un espace plus considérable, et celle qui est interceptée dans la partie supérieure se trouve au contraire graduellement comprimée et acquiert, par conséquent, une force élastique de plus en plus grande. Ainsi, la différence des deux pressions, s'augmentant de plus en plus, produit une résistance toujours croissante contre le piston, et finit par le ramener doucement au repos. On remarquera du reste que, dans ce règlement de la soupape d'équilibre, la vapeur refoulée dans le haut du cylindre recueille tout le travail développé par le piston, pendant qu'il est ramené au repos, et qu'à cet état de compression elle contribue ensuite à produire la nouvelle course descendante du piston. Il n'y a donc aucune

perte d'action, puisque la dépense de vapeur ne se compose que de la portion qui est restée interceptée au-dessous du piston.

Néanmoins, quand le contre-poids est très-faible, ou que l'on n'a pas besoin d'une grande vitesse, il arrive souvent, dans ces machines, qu'on n'intercepte pas de vapeur au-dessus du piston, et que celui-ci est ramené au repos par le seul choc du balancier contre les gardes qui limitent ses oscillations. On fait alors une légère perte de vapeur, en ce qu'on aurait pu arrêter le piston par la vapeur comprimée, et sauver, par conséquent, cette vapeur après sa compression; mais, comme cet arrangement n'est employé que quand le contre-poids n'excède que de très-peu les résistances exercées contre sa chute, et que d'ailleurs, à mesure que la maîtresse tige des pompes descend dans l'eau du puits, elle perd de son poids par immersion, ce qui diminue d'autant sa prépondérance, il arrive toujours que le choc du balancier est peu considérable et peut être négligé relativement au travail total de la machine.

§ II *Des conditions du travail de la machine.*

Nous venons d'expliquer le mode d'action et le règlement des machines de Watt à simple action. En comparant ces machines à celles que nous avons traitées jusqu'ici, on voit qu'elles en diffèrent par trois circonstances : 1°. le contre-poids agit alternativement comme résistance et comme force motrice; 2°. pendant son action comme force motrice, il exécute le mouvement par l'effet de sa chute; 3° il n'y a ni continuité ni uniformité dans le mouvement de la résistance. Il convient donc d'examiner si ces circonstances doivent changer les bases qui nous ont servi à établir la théorie des autres machines.

1°. Relativement à l'action alternative du contre-poids comme résistance et comme force motrice, il n'en doit résulter aucun changement dans le mode de raisonner; car ce contre-poids agit précisément à la manière d'un volant ordinaire, tel qu'il en existe dans les machines que nous avons traitées jusqu'à présent. En effet, le mouvement de la machine à simple action se compose de deux parties distinctes : la course descendante, pendant laquelle l'eau est élevée dans les pompes d'épuisement, c'est-à-dire pendant laquelle l'effet utile se produit; et la course remontante exécutée par le contre-poids, et qui n'est accompagnée d'aucun effet utile: tout consistant, pour cette course, à replacer les choses au même point qu'à l'origine, afin que la vapeur soit mise en état d'agir de nouveau. Or, pendant la première période de ce mouvement, une certaine quantité de travail est communiquée au contre-poids, en l'élevant à une certaine hauteur; et pendant la seconde période, il ne fait que restituer cette quantité de travail à la machine, par sa descente de la même hauteur où il était monté. Son rôle se borne donc à recueillir d'abord une certaine quantité d'action, pour la délivrer ensuite en temps opportun, pendant la suspension d'effort de la force motrice, et, par conséquent, son action est de même nature que celle d'un volant ordinaire.

2°. Pendant la course montante du piston, la gravité du contre-poids devient la force motrice du mouvement, et il est incontestable que la vitesse qui se produit dans cette course dépend de la supériorité du contre-poids sur la résistance alors opposée par la machine. Si donc on voulait faire une distinction entre la vitesse de la course descendante et celle de la course montante du piston, il faudrait nécessairement calculer la seconde d'après les circonstances de la chute du contre-poids. Mais, on remarquera que, pour la machine, une oscillation *complète* se compose d'une course montante et d'une course descendante du piston. Il importe peu qu'une course soit très-rapide et l'autre très-lente. Si leurs vitesses respectives sont égales, le mouvement du piston, pendant la durée de l'oscillation, sera régulier; si elles sont inégales, au contraire, ce mouvement se trouvera accéléré en un point et retardé en un autre. Mais, dans un cas comme dans l'autre la véritable vitesse de la machine, celle que l'on a besoin de connaître pour calculer son effet utile, consistera toujours dans le nombre des oscillations complètes qu'elle donne par minute.

En effet, dès que nous connaîtrons ce nombre, nous aurons nécessairement aussi l'effet utile de la machine, puisqu'à chaque oscillation complète, nous savons que la charge avance de la longueur d'une course.

Ainsi, la vitesse que l'on a besoin de connaître pour calculer l'effet utile n'est pas la vitesse avec laquelle s'exécute la course montante ou la course descendante du piston, mais bien la vitesse moyenne prise sur l'ensemble des deux courses. Or, celle ci est nécessairement réglée à priori par la production de vapeur dans la chaudière, et peut se calculer directement d'après cette donnée. Car, si la chaudière produit par minute et transmet au cylindre une certaine quantité de vapeur dont le volume soit connu, il est clair que, puisque ce volume de vapeur s'écoule par le cylindre dans une minute, en le divisant par la contenance du cylindre qui se remplit de vapeur, on aura le nombre des oscillations complètes qu'il fournira pour la machine. Ce sera donc la vitesse moyenne du piston, et cela, quelque rapide qu'ait été d'ailleurs le mouvement du piston en un point de son oscillation, et quelque lent, au contraire, qu'il ait pu se trouver en un autre point de cette même oscillation.

Par conséquent, on voit que la vitesse ou le nombre des oscillations de la machine par minute dépendra toujours de la vaporisation de la chaudière, comme dans les cas examinés précédemment.

3°. Ces machines ne sont pas munies d'un volant, et le mouvement de la résistance n'y est ni continu ni uniforme. Mais la conservation de la machine exige qu'on y régularise et qu'on y modère les effets de la force motrice, de telle sorte qu'à la fin de chaque alternation de mouvement, le piston se trouve ramené au repos sans choc et par degrés insensibles.

En effet nous avons expliqué, en parlant du règlement de la machine, que, dans

la course descendante, on ferme de plus en plus la soupape à gorge, ou l'on diminue graduellement la portion de course pendant laquelle la vapeur est admise dans le cylindre, jusqu'à ce qu'on trouve que la détente de cette vapeur suffit pour conduire le piston juste au point où il doit terminer sa course; de manière qu'il s'y arrête de lui-même sans le dépasser, c'est-à-dire sans qu'il y ait un choc du piston contre le fond du cylindre, ou du balancier contre les gardes du mouvement. Il ne se produit donc dans cette course aucune perte de force vive. Quant à la course remontante, nous avons expliqué de même, qu'en faisant varier le contre-poids, ou en refermant la soupape d'équilibre un peu plus tôt ou un peu plus tard, pour intercepter plus ou moins de vapeur au-dessus du piston, on ramène celui-ci au repos, sans qu'il se produise aucun choc digne d'être pris en considération.

Cet ajustement de la machine doit nécessairement être changé chaque fois que la charge varie; mais une fois qu'il est effectué, c'est-à-dire dès que la machine est arrivée à sa marche régulière, on voit que le piston se trouve toujours, dans un sens et dans l'autre, ramené au repos par degrés insensibles et sans perte de force vive. Ainsi, dans les machines à simple action, aussi bien que dans celles de divers systèmes que nous avons traitées déjà, il y a toujours égalité entre le travail développé par la puissance et celui qui est exécuté par la résistance; et, par conséquent, nous pourrons appliquer à ces machines le même mode de raisonnement dont nous avons fait usage jusqu'ici.

Il faut seulement observer que cette égalité de travail, entre la puissance et la résistance, a lieu dans chaque course séparément. Ainsi, cette double condition fournira d'abord deux équations de relation, entre les forces et les résistances appliquées à la machine. Ensuite, une troisième relation sera donnée par la condition que la production de vapeur soit égale à sa dépense. Nous établirons donc d'abord ces trois équations fondamentales; puis nous en déduirons les formules propres à la solution des diverses questions qui peuvent se présenter dans la pratique.

§ III. *Des effets de la machine avec une détente, un contre-poids et une charge ou une vitesse quelconques.*

Nous avons vu que, dans les machines à double action et sans détente, il se présente deux cas dans le travail de la machine, savoir, celui d'une charge ou d'une vitesse quelconques, et celui de la charge ou de la vitesse qui produisent le maximum d'effet utile. Nous avons vu ensuite que, dans les machines à double action, à détente, il se présente un troisième cas, savoir, celui où cette détente, au lieu d'être donnée à priori, est au contraire déterminée de manière à produire le travail le plus favorable de la machine. Mais dans les machines à simple action, à détente, nous voyons un nouvel élément de plus, savoir, le poids du contre-poids. Nous devons donc distinguer quatre cas dans le travail de ces machines, savoir :

Celui où elles travaillent avec une détente, un contre-poids et une charge (ou une vitesse) quelconques, c'est-à-dire fixée arbitrairement à priori;

Celui où elles travaillent avec une détente et un contre-poids arbitraires, mais avec la charge la plus favorable pour ce contre-poids et cette détente;

Celui où elles travaillent avec une détente arbitraire, mais avec le contre-poids et la charge le plus favorables pour cette détente;

Enfin, celui où la détente, aussi bien que la charge et le contre-poids, ont été déterminés pour le travail le plus favorable de la machine; ce qui lui fait produire son maximum *absolu* d'effet utile, puisque toutes les arbitraires du problème sont alors fixées d'après cette condition.

Nous allons successivement étudier ces quatres cas, en commençant par le premier, qui est le plus général; et, pour cela, nous établirons les équations qui expriment les conditions du mouvement de ces machines, savoir : l'égalité du travail de la puissance et de la résistance dans chacune des deux courses, et l'égalité de la dépense et de la production de vapeur pendant le mouvement.

1°. Pour considérer d'abord la course descendante du piston, le travail appliqué par la vapeur, tant par son action directe que par sa détente, doit se retrouver en entier dans le travail exécuté par la résistance. Or, en adoptant toutes les notations employées jusqu'ici, c'est-à-dire en appelant P' la pression moyenne inconnue de la vapeur pendant son admission dans le cylindre, a l'aire du cylindre, l la course du piston, l' la portion de cette course parcourue avant le commencement de la détente, c la liberté du cylindre ou la valeur moyenne de l'espace que ne parcourt pas le piston à chaque extrémité du cylindre, et en se reportant d'ailleurs au calcul qui a été développé § I de l'art. II du chap. IV, on aura pour le travail exécuté par l'arrivée directe et par la détente de la vapeur dans le cylindre, l'expression suivante :

$$a(l'+c)(n+P')\left(\frac{l'}{l'+c}+\log\frac{l+c}{l'+c}\right)-nal.$$

D'un autre côté, la résistance se compose alors de la charge utile ρ' de la maitresse pompe, mesurée par unité de la surface du piston, et rapportée à la vitesse du piston, c'est-à-dire en tenant compte des bras de levier de la pompe et du piston relativement à l'axe du balancier; du contre-poids que nous exprimerons par Π, en le supposant réparti par unité de la surface du piston; de la pression p subsistant sous le piston, en raison de la condensation imparfaite de la vapeur; et enfin, du frottement $f'+\delta(\rho'+\Pi)$ de la machine chargée de la résistance $\rho'+\Pi$, en appelant f' le frottement de la machine non chargée, et δ l'accroissement que subit ce frottement par unité de la charge, accroissement qui est également produit par le poids du contre-poids. Nous entendons ici par frottement de la machine non chargée, non-seulement son frottement propre, ou l'effort nécessaire pour

mouvoir les divers joints et surfaces frottantes du mécanisme, mais encore toutes les résistances non comptées dans l'effet utile, comme l'effort nécessaire au travail de la pompe d'eau froide pour condenser la vapeur, de la pompe d'eau chaude pour alimenter la chaudière, et autres pompes indispensables à l'action de la machine et qui seraient mises en jeu dans cette course.

D'après ces notations, le travail exécuté pendant la course par l'ensemble de ces diverses résistances sera donc

$$[(1+\delta)(\rho'+\pi)+p+f']\,al.$$

Par conséquent, on aura la relation

$$a(l'+c)(n+P')\left(\frac{l'}{l'+c}+\log\frac{l+c}{l'+c}\right)-nal=[(1+\delta)(\rho'+\pi)+p+f']\,al,$$

et en écrivant, pour simplifier,

$$k'=\frac{l'}{l'+c}+\log\frac{l+c}{l'+c},$$

l'expression obtenue plus haut deviendra

$$n+P'=\frac{l}{l'+c}\cdot\frac{1}{k'_1}[n+(1+\delta)(\rho'+\pi)+p+f'].\qquad\text{(A)}$$

Ce sera donc la première des relations cherchées, entre les données et les inconnues du problème.

2°. Pour avoir maintenant la relation pareille pour la course montante, il faut exprimer que la même égalité y existe entre les quantités d'action développées par la puissance et par la résistance.

Or, la puissance est ici le contre-poids, et la résistance se compose de l'opposition exercée par la vapeur, après la clôture de la soupape d'équilibre, de la résistance opposée par la pompe préparatoire, ordinairement mise en jeu dans cette course, et qui sert à élever l'eau du puits dans le réservoir de la maîtresse pompe, et enfin, du frottement de la machine.

Nous entendons également ici par frottement la somme de toutes les résistances non employées à l'effet *utile*, que doit surmonter la machine pour opérer son mouvement; c'est-à-dire, non-seulement le frottement des divers joints du mécanisme, mais encore l'effort nécessaire au travail de la pompe d'air et de toute autre pompe de service qui pourrait être mise en jeu dans cette course; et nous y comprenons aussi la résistance toujours très-petite exercée contre le piston par les gardes du mouvement, lorsqu'ils sont frappés par le balancier, à la fin de la course. Le frottement de la machine non chargée, dans la course montante, n'est donc pas exactement le même que le frottement de la machine supposée non chargée dans la course descendante, et nous l'exprimerons, en conséquence, par f'', au lieu de f'.

Cela posé, la quantité de travail développée par le contre-poids durant la course est

$$nal.$$

Celle qui est développée par le frottement f'' et par la pompe préparatoire ρ'' est

$$f''al + \rho''al;$$

car, on doit remarquer que la pompe préparatoire, étant mise en jeu par l'action directe et immédiate du contre-poids et sans l'intermédiaire du balancier, ne cause par elle-même aucun frottement additionnel de la machine. Enfin, quant à celle qui est développée par la résistance de la vapeur, elle exige un court calcul, analogue à celui qui a été fait déjà pour la détente.

Pendant le mouvement ascendant du piston, et avant la clôture de la soupape d'équilibre, la pression de la vapeur située au-dessus du piston est nécessairement un peu plus considérable que celle de la vapeur située au-dessous, puisque c'est en vertu de la différence entre ces deux pressions que la vapeur s'écoule d'un côté à l'autre. Cependant, comme cette différence est toujours très-faible quand la soupape d'équilibre est suffisamment large, et qu'on peut, par conséquent, la négliger sans erreur, nous supposerons ici que, jusqu'au moment de la clôture de la soupape d'équilibre, le piston se trouve en équilibre dans la vapeur, c'est-à-dire se trouve pressé également sur ses deux faces.

Or, pendant tout le temps que la soupape d'équilibre reste ouverte, les deux parties du cylindre se trouvent occupées par la vapeur qui a subi la détente dans la course descendante antérieure. Cette vapeur, au moment où elle est arrivée dans le cylindre, avait la pression P', et elle occupait la longueur $(l' + c)$ du cylindre. En ce moment, elle se trouve répandue dans la totalité du cylindre, y compris les deux espaces libres que ne parcourt pas le piston. Donc, d'après la relation (c) démontrée entre les volumes et les pressions d'un même poids de vapeur pendant son action dans les machines, chap. IV, art. II, § I, la pression de la vapeur, après sa dilatation dans les deux parties du cylindre, est devenue

$$\varpi = (n + P')\frac{l' + c}{l + 2c} - n.$$

En outre, soit l'' la longueur déjà parcourue par le piston dans sa course montante, au moment où l'on ferme la soupape d'équilibre. A partir de ce point, le piston continuant encore son mouvement en vertu de sa vitesse acquise et de l'effort du contre-poids, la vapeur enfermée *au-dessus*, et qui ne peut plus s'échapper, prend, par la compression, une force élastique de plus en plus grande, et celle qui existe *au-dessous*, en prend, au contraire, une de plus en plus petite.

Soit donc le piston parvenu à la distance λ du commencement de sa course, et soient, en ce point, ϖ'' la pression de la vapeur inférieure au piston, et ϖ' celle de

la vapeur qui lui est supérieure. Supposons alors que le piston parcoure de plus un espace élémentaire $d\lambda$, le travail correspondant, produit par la résistance de la vapeur, sera

$$(\omega' - \omega'')\,a d\lambda.$$

Mais comme les pressions ω' et ω'', qui ont lieu dans les deux parties du cylindre, résultent des espaces respectivement occupés par la vapeur, soit au-dessus, soit au-dessous du piston, et qu'à l'origine de cette compression et de cette dilatation de la vapeur, les deux portions considérées du cylindre étaient remplies de vapeur à la pression ω, on aura encore, entre les pressions et les volumes respectivement occupés par la vapeur, la relation

$$\omega' = (n + \omega)\frac{l - l'' + c}{l - \lambda + c} - n,$$

et

$$\omega'' = (n + \omega)\frac{l'' + c}{\lambda + c} - n.$$

Donc, le travail élémentaire ci-dessus sera

$$(\omega' - \omega'')\,a d\lambda = a(n + \omega)\left[(l - l'' + c)\frac{d\lambda}{l - \lambda + c} - (l'' + c)\frac{d\lambda}{\lambda + c}\right].$$

Ou bien, en mettant pour ω sa valeur donnée plus haut, cette expression deviendra

$$(\omega' - \omega'')\,a d\lambda = a\frac{l' + c}{l + 2c}(n + \mathrm{P}')\left[(l - l'' + c)\frac{d\lambda}{l - \lambda + c} - (l'' + c)\frac{d\lambda}{\lambda + c}\right].$$

Actuellement, comme cet effet de compression d'un côté, et de dilatation de l'autre, se produit depuis la longueur l'' du cylindre jusqu'à la fin de la course, en prenant l'intégrale de cette expression entre les limites l'' et l, on aura la quantité de travail total développée par la vapeur dans son action résistante contre le piston, savoir :

$$a\frac{l' + c}{l + 2c}(n + \mathrm{P}')\left[(l - l'' + c)\log\frac{l - l'' + c}{c} - (l'' + c)\log\frac{l + c}{l'' + c}\right].$$

Mais si l'on fait, pour abréger,

$$k'' = \frac{l - l'' + c}{l + 2c}\log\frac{l - l'' + c}{c} - \frac{l'' + c}{l + 2c}\log\frac{l + c}{l'' + c},$$

on pourra écrire l'expression précédemment obtenue sous la forme

$$k'' a l(n + \mathrm{P}')\frac{l' + c}{l}.$$

C'est donc l'expression du travail produit par la compression de la vapeur, et l'on remarquera que si, dans une machine de ce système, on ne fermait la soupape d'équilibre qu'à la fin de la course, ce cas ne se trouverait pas moins compris dans la formule, puisqu'il suffirait alors de faire $l'' = l$, ce qui donnerait $k'' = 0$; et alors le travail produit par la compression de la vapeur serait nul pour ce cas particulier.

Ainsi, en se reportant à ce qu'on a dit plus haut du travail exécuté pendant la même course, par le contre-poids, la pompe préparatoire et le frottement de la machine, on trouvera que l'égalité entre l'action développée par la puissance et celle développée par la résistance, pendant la course montante du piston, produit l'équation

$$k''al(n + P')\frac{l' + c}{l} + f''al + \rho''al = \Pi al,$$

ou

$$n + P' = \frac{l}{l' + c} \cdot \frac{1}{k''}(\Pi - f'' - \rho''). \qquad \text{(B)}$$

C'est donc la seconde relation entre les données et les inconnues du problème.

3°. Enfin, pour obtenir la troisième relation, exprimant l'égalité entre la dépense et la production de vapeur, il faut observer qu'il ne se condense, et par, conséquent, qu'il ne se dépense à chaque coup de piston, que la vapeur qui, pendant la course remontante, est passée au-dessous du piston; car celle qni a été interceptée au-dessus se trouve refoulée vers la chaudière et sert à la course suivante.

Or, la pression de la vapeur qui doit être condensée, prise au moment où l'on en fait la séparation, est donnée par l'équation

$$n + \omega = (n + P')\frac{l' + c}{l + 2c}.$$

En outre, le volume de cette vapeur, qui doit être condensé à chaque coup de piston, est

$$a(l'' + c).$$

S'il se donne un nombre M de coups de piston par minute, le volume de cette vapeur dépensé par minute sera donc

$$Ma(l'' + c).$$

Mais, V étant la vitesse moyenne du piston, ou l'espace qu'il parcourt dans une minute, tant en montant qu'en descendant, on aura $V = 2Ml$; ou bien si, pour se conformer à l'usage adopté avec raison pour ces machines, on ne compte que l'espace v parcouru par le piston en produisant l'effet utile, espace qui est moitié de celui parcouru par le piston dans les deux courses, on aura

$$v = Ml, \text{ ou } M = \frac{v}{l}.$$

Donc, le volume ci-dessus, dépensé par le cylindre, pourra être exprimé par

$$av\frac{l''+c}{l}.$$

D'un autre côté, si l'on représente par S le volume d'eau vaporisé par minute dans la chaudière, le volume de vapeur qui en résultera sous la pression P de production sera, d'après ce que nous avons vu, chap. II, art. I, § VI,

$$\frac{mS}{n+P}.$$

Ce sera le volume occupé par la vapeur sous la pression P; mais, en passant à la pression ω, qui est celle à laquelle nous mesurons la vapeur dépensée, ce volume deviendra

$$\frac{mS}{n+P}\cdot\frac{n+P}{n+\omega}=\frac{mS}{n+\omega}.$$

Donc, puisque la dépense du cylindre est égale à la production de la chaudière, on aura

$$av\frac{l''+c}{l}=\frac{mS}{n+\omega};$$

ou bien, en mettant pour $(n+\omega)$ sa valeur,

$$n+P'=m\frac{l+2c}{l''+c}\cdot\frac{l}{l'+c}\cdot\frac{S}{av}. \qquad \text{(C)}$$

C'est la troisième relation cherchée.

Par conséquent, en éliminant la quantité inconnue P', d'abord entre les deux équations (A) et (C), puis entre les deux équations (B) et (C), ce qui se borne à égaler simplement les seconds membres de ces équations, on en déduira les deux relations préliminaires

$$\frac{1}{k'}[n+p+f'+(1+\delta)\rho'+(1+\delta)\Pi]=m\frac{l+2c}{l''+c}\cdot\frac{S}{av},$$

$$\frac{1}{k''}[\Pi-\rho''-f'']=m\frac{l+2c}{l''+c}\cdot\frac{S}{av}.$$

Enfin, en tirant de la seconde de ces équations la valeur de Π, pour la substituer dans la première, résolvant la résultante par rapport aux diverses inconnues du problème, et faisant $\rho'+\rho''=r$ pour comprendre sous une seule désignation la charge des diverses pompes qui produisent l'effet *utile*, on obtiendra définitivement les formules suivantes :

$$v=m\frac{S}{a}\cdot\frac{l+2c}{l''+c}\cdot\frac{k'-(1+\delta)k''}{(1+\delta)r+n+p+f'+(1+\delta)f''}, \qquad (1)$$

$$ar = m\frac{S}{v}\cdot\frac{l+2c}{l''+c}\left(\frac{k'}{1+\delta}-k''\right)-\frac{a}{1+\delta}[n+p+f'+(1+\delta)f''], \qquad (2)$$

$$S=\frac{av}{m}\cdot\frac{l''+c}{l+2c}\cdot\frac{(1+\delta)r+n+p+f'+(1+\delta)f''}{k'-(1+\delta)k''}, \qquad (3)$$

$$\text{E. u.} = arv. \qquad (4)$$

Ces équations feront donc connaître immédiatement les effets d'une machine dont les dimensions et les autres données diverses sont connues; mais, relativement à ces dernières quantités, il est nécessaire d'ajouter ici quelques observations.

Dans les formules qui précèdent, on voit figurer : 1°. les dimensions de la machine, comme a, l, c, qui sont nécessairement connues à priori; 2°. les pressions de la vapeur P, p, que l'on peut toujours observer au moyen du manomètre, et que l'on doit, par conséquent, regarder comme données directement; 3°. les frottemens f', f'' et δ, qui résultent de la construction de la machine, et peuvent être évalués à priori, d'après des essais faits sur des machines semblables; et 4°., enfin, les variables du problème, comme la charge, la vitesse, la vaporisation, la course d'admission ou détente $\frac{l'}{l}$, et la course d'équilibre $\frac{l''}{l}$. Parmi ces variables, les quantités v, r et S sont toujours données directement quand elles ne sont pas l'objet même de la recherche dont on s'occupe, ou l'inconnue de la question. On en peut dire autant de la course d'admission $\frac{l'}{l}$, puisqu'au moyen des appareils en usage, tels que la soupape régulatrice, le régulateur ou la soupape à gorge, on peut toujours faire travailler une machine à une détente *donnée* quelconque, pourvu seulement que cette détente ne dépasse pas une certaine limite, au-delà de laquelle la vapeur deviendrait incapable d'exécuter la course du piston avec la charge voulue. Ainsi, toutes ces quantités sont données à priori et d'une manière directe; mais il n'en est pas de même de $\frac{l''}{l}$.

En effet, dans les cas ordinaires, cette quantité n'est pas une des données primitives du problème, et elle devrait, par conséquent, disparaître des équations, tandis que le contre-poids Π, qui est la vraie donnée originale, devrait y figurer. La nature de la fonction transcendante k'' ne nous ayant pas permis l'élimination de l'', nous avons dû, au contraire, éliminer Π, et laisser subsister l'' dans les équations; mais il convient maintenant de fournir les moyens de connaître l'' en fonction de Π, de telle sorte qu'on puisse toujours regarder cette quantité comme une donnée réelle de la question, quoiqu'elle ne soit pas connue à priori.

Pour connaître l'' en fonction de Π, il suffit de recourir aux équations générales (A), (B), (C). En effet, en éliminant successivement P' entre les deux premières, puis entre les deux dernières, et remplaçant ρ', par sa valeur $\rho' = r - \rho''$, on obtient les relations

$$k'' = k' \frac{\Pi - \rho'' - f''}{(1+\delta)(\Pi + r - \rho'') + n + p + f'}, \qquad \text{(E)}$$

$$\frac{l + 2c}{l'' + c} k = \frac{av}{mS} (\Pi - \rho'' - f''). \qquad \text{(E')}$$

On voit donc que, dès que l'on connaîtra le contre-poids de la machine, et qu'on aura sa charge ou sa vitesse, la quantité $\frac{l''}{l}$ s'ensuivra immédiatement. Dans le cas du maximum d'effet utile, on ne connaît pas à priori la vitesse ni la charge de la machine, mais alors la quantité l'' sera déterminée directement, comme on le verra plus loin.

On remarquera que la portion de charge ρ'' due à la pompe préparatoire, et contenue dans ces équations, est une quantité constante et facultative. qui diminue d'autant, il est vrai, la charge ρ' de la maitresse pompe, mais qui ne préjuge rien sur la charge *totale* et réelle $r = \rho' + \rho''$ de la machine. Les équations (E), (E') permettront donc, dans tous les cas, de déterminer $\frac{l''}{l}$ en fonction du contre-poids; et, par conséquent, cette quantité pourra toujours être considérée comme une donnée de la question, même dans le cas où, au lieu d'être fixée à priori, elle ne serait connue que secondairement, au moyen du contre-poids.

Pour déduire numériquement, des équations que nous venons de présenter, la valeur de $\frac{l''}{l}$, il faudra exécuter les opérations arithmétiques indiquées dans le second membre, et celui-ci, se trouvera ainsi représenté par un nombre unique. Alors, pour l'équation (E) on cherchera dans la Table des valeurs de k'', dont nous parlerons dans un instant, celle de ces valeurs qui est égale au nombre obtenu, et on trouvera immédiatement, inscrite en face, la valeur correspondante de $\frac{l''}{l}$. Pour l'équation (E), ayant de même calculé la valeur du second membre, on fera une supposition sur $\frac{l''}{l}$ et la Table ayant fait connaître la valeur correspondante de k'', on exécutera le produit

$$\frac{l + c}{l'' + c} k''.$$

Alors on verra si ce produit est égal au nombre qui représente le second membre de l'équation. S'il est égal à ce nombre, la valeur supposée pour $\frac{l''}{l}$ sera celle que l'on cherche, et le problème sera résolu. S'il ne lui est pas égal, on fera sur l'' une autre supposition un peu différente de la première, et l'on verra de même si elle satisfait à l'équation. On continuera ainsi à faire varier l'' dans le sens

qui rapproche les résultats, jusqu'à ce qu'on soit parvenu à la solution cherchée. Du reste, il faut noter que cette recherche est excessivement simple, et qu'on arrive toujours au résultat en deux ou trois essais.

Enfin, il reste encore un mot à dire relativement aux deux quantités k' et k'' contenues dans les formules. Nous avons donné les fonctions qu'elles représentent, et, par conséquent, on pourrait les calculer directement. Cependant, pour ôter toute difficulté à cet égard, nous donnerons un peu plus loin des Tables n°s. II et III, où on les trouvera toutes calculées. On pourra donc, quand $\frac{l'}{l}$ ou $\frac{l''}{l}$ seront données, en déduire à la simple vue k' et k''; ou, réciproquement, ces dernières quantités étant connues, les Tables donneront immédiatement les valeurs correspondantes de $\frac{l'}{l}$ et $\frac{l''}{l}$. Du reste, si l'on n'avait pas ces Tables sous les yeux, on se souviendrait que k' et k'' représentent les expressions suivantes :

$$k' = \frac{l'}{l'+c} + \log \frac{l+c}{l'+c},$$

$$k'' = \frac{l-l''+c}{l+2c} \log \frac{l-l''+c}{c} - \frac{l''+c}{l \times 2c} \log \frac{l+c}{l''+c};$$

et comme, dans ces expressions, les logarithmes sont des logarithmes hyperboliques, on les obtiendrait en multipliant les logarithmes ordinaires des Tables par le nombre 2.302585, ou, approximativement, par le nombre 2.303.

§ IV. *De la charge ou de la vitesse qui produisent le maximum d'effet utile, avec un contre-poids et une détente donnés.*

Les formules qui précèdent donnent le moyen de calculer l'effet utile d'une machine dès que toutes les données diverses qui figurent dans les équations sont connues. Mais, parmi ces données, il y en a de deux sortes : les unes, constantes dans une même machine, comme les dimensions du cylindre, le frottement, la pression dans la chaudière, la pression de condensation, etc.; et les autres, au contraire, variables à la volonté du machiniste, savoir : la charge r, ou la vitesse v, le contre-poids Π, lequel fixe la course d'équilibre $\frac{l''}{l}$, et, enfin, la course d'admisson ou détente $\frac{l'}{l}$. Puisque ces dernières quantités peuvent être variées à volonté, nous allons donc chercher parmi toutes les diverses valeurs qu'il est possible de leur donner, celles qui sont le plus avantageuses au travail de la machine. C'est pourquoi nous déterminerons d'abord la charge ou la vitesse qui lui feront produire son maximum d'effet utile, pour un contre-poids et une détente donnés; ensuite, supposant qu'à chaque contre-poids on attribue, d'après la recherche précédente, la charge qui lui est le plus avantageuse, nous chercherons, parmi tous ces contre-poids, quel est

celui qui fera produire à la machine son plus grand effet utile, pour la détente fixée ; puis enfin, supposant que, pour chaque détente possible, on emploie le contre-poids le plus avantageux et en même temps la charge la plus favorable pour ce contre-poids, nous chercherons, parmi toutes ces détentes ou courses d'admission, quelle est celle qui rendra l'effet utile un maximum. Alors, en donnant à la machine cette course d'admission, puis l'accompagnant du contre poids et de la charge le plus favorables, il est clair qu'on lui fera produire le maximum *absolu* d'effet utile dont elle est capable, puisque toutes les variables du problème auront été déterminées successivement, de manière à rendre l'effet utile le plus grand que la machine soit en état de produire.

D'après les formules que nous avons obtenues plus haut, on voit que, pour chaque charge r imposée à la machine sans rien changer au contre-poids ni à la détente, le piston prend une certaine vitesse. Il s'ensuit donc que, pour chaque charge, il se produit un certain effet utile correspondant. Or, les effets utiles, ainsi produits, doivent nécessairement différer entre eux. Donc, parmi les différentes charges qu'on peut donner à la machine, il doit s'en trouver une qui lui fera produire son maximum d'effet utile, avec le contre-poids et la détente fixés.

Pour arriver à la connaissance de cette charge, il faut d'abord former l'expression de l'effet utile de la machine avec une charge quelconque r ; puis, chercher la valeur de r qui rendra cet effet utile un maximum. Or, la vitesse de la machine, avec la charge r, a pour expression

$$v = m\frac{S}{a}\cdot\frac{l+2c}{l''+c}\cdot\frac{k'-(1+\delta)k''}{(1+\delta)r+n+p+f'+(1+\delta)f''};$$

et en multipliant les deux termes de cette équation par ar, on obtient

$$arv = mS\frac{l+2c}{l''+c}\cdot\frac{[k'-(1+\delta)k'']r}{(1+\delta)r+n+p+f'+(1+\delta)f''}.$$

C'est donc l'expression de l'effet utile de la machine avec la charge r. Mais on remarquera que, puisque nous supposons le contre-poids et la détente fixés, la valeur de arv ne contient de variable que la fraction

$$\frac{r}{(1+\delta)r+n+p+f'+(1+\delta)f''}.$$

D'autre part, il est évident que tout accroissement de r, introduit dans cette fraction, augmente son numérateur en plus grand rapport que son dénominateur, et, par conséquent, augmente sa valeur totale. Donc, d'abord, le maximum de r produira aussi le maximum de arv. Mais l'équation (A), savoir :

$$n+P' = \frac{l}{l'+c}\cdot\frac{1}{k'}[(1+\delta)r+n+p+f'+(1+\delta)\Pi],$$

prouve que la plus grande valeur de r sera donnée par la plus grande valeur possible de P', et celle-ci est $P' = P$. Donc enfin, en introduisant cette condition dans les équations (A) et (C), on aura la charge et la vitesse cherchées, qui seront

$$v' = m \frac{l + 2c}{l'' + c} \cdot \frac{l}{l' + c} \cdot \frac{S}{a} \cdot \frac{1}{n + P}, \qquad (5)$$

$$ar' = a \frac{l' + c}{l}\left(\frac{k'}{1 + \delta} - k''\right)(n + P') - \frac{a}{1 + \delta}[n + p + f' + (1 + \delta)f'']. \qquad (6)$$

Ces deux équations feront donc connaitre la charge et la vitesse qui produisent le maximum d'effet utile, avec un contre-poids et une détente donnés.

§ V. *Détermination du frottement de la machine non chargée et de son frottement additionnel par unité de la charge supportée par le piston.*

Les relations que nous venons d'obtenir peuvent servir à déterminer le frottement propre de la machine, ainsi que son frottement additionnel résultant de la charge que supporte le piston.

En effet, si l'on suppose qu'on ne donne à la machine aucune charge, c'est-à-dire qu'on détache des pompes la maîtresse tige, en l'équilibrant convenablement par les contre-balanciers, puis qu'on baisse de plus en plus la pression dans la chaudière, jusqu'à ce que tout ce que peut faire la machine soit de pousser le piston jusqu'au bout de sa course en surmontant son propre frottement, et qu'on referme la soupape d'équilibre assez à temps pour empêcher le choc des gardes du balancier dans la course montante, il est clair que le frottement sera alors devenu une charge maximum pour la machine, du moins avec la pression qui existe dans sa chaudière. Donc, en exprimant par P'' la pression observée dans la chaudière, les équations générales (A) et (B) auront lieu en y fesant à la fois $P' = P''$, $\rho' = 0$, $\rho'' = 0$, et l'on aura :

$$f' = \frac{l' + c}{l} k' (n + P'') - (n + \Pi) - \delta \Pi,$$

$$f'' = \Pi - \frac{l' + c}{l} k'' (n + P'').$$

Ces équations feront connaitre le frottement cherché ; puisque la détente $\frac{l'}{l}$, ainsi que $\frac{l''}{l}$, pouvant être mesurées sur la machine, les quantités k' et k'' sont connues ; qu'en outre, on peut mesurer, par le manomètre et l'indicateur, la pression P'' dans la chaudière et la pression p de condensation dans le cylindre à vapeur, et qu'enfin le terme $\delta\Pi$ peut être négligé.

Pour connaître ensuite la quantité δ, il suffit de faire fonctionner la machine avec une charge connue ρ' dans la course descendante, en baissant toujours de plus en plus la pression dans la chaudière, au moyen de la soupape de sûreté, jusqu'à ce qu'on voie qu'avec une pression plus faible, la vapeur serait incapable de pousser le piston jusqu'au bout de sa course. Alors il est clair encore que la charge ρ' sera la plus grande que la machine soit capable de mouvoir avec sa pression réduite. Si donc nous appelons P''' cette pression déterminée par l'observation, l'équation (A) sera satisfaite en y faisant $P' = P'''$. Donc, on aura

$$\delta = \frac{\frac{l'+c}{l} k' (n + P''') - (n + \rho' + \Pi) - f'}{\rho' + \Pi};$$

et cette équation fera connaître la quantité δ, puisque f' est supposé connu par la recherche précédente. Comme, cependant, la valeur de f' n'a été trouvée qu'en négligeant δ, on pourra profiter de la détermination actuelle de cette quantité pour reprendre le calcul précédent et obtenir une autre valeur de f' plus exacte que la première.

On peut encore déterminer les frottemens f' et f'' sans rien changer au travail ordinaire de la machine, pourvu seulement que sa charge ρ'', dans la course montante, soit connue avec exactitude. Pour cela, il suffit de baisser la pression dans la chaudière jusqu'à ce que la charge habituelle de la machine devienne un maximum pour cette pression, et de faire travailler le piston sans choc à la fin de la course montante. En effet, en appelant P_1 la pression alors observée dans la chaudière, l'équation générale (B) se trouvera satisfaite en y faisant $P' = P_1$, et, par conséquent, on aura

$$f'' = \Pi - \rho'' - \frac{l'+c}{l} k'' (n + P_1).$$

Ainsi, en mesurant sur la machine la course d'admission $\frac{l'}{l}$ et la prépondérance du contre-poids, on aura la valeur cherchée de f''. Ensuite, en tenant compte de la différence de charge des pompes de service mises en jeu dans la course descendante comparativement à la course montante, on en déduira la valeur de f'. C'est un mode de détermination dont on verra un exemple un peu plus loin.

On pourra donc toujours déterminer le frottement de la machine, et son frottement additionnel; et après avoir mesuré ces frottemens dans plusieurs machines, on en déduira une moyenne qui servira à évaluer le frottement des machines avant leur construction.

§ VI. *Du contre-poids le plus avantageux pour une détente donnée.*

Les formules que nous avons obtenues plus haut paraissent indépendantes du contre-poids de la machine, mais elles ne le sont pas en réalité, parce qu'elles con-

tiennent les quantités $\frac{l''}{l}$ et k'', lesquelles fixent la valeur du contre-poids, ou sont, au contraire, déterminées par lui, d'après la condition exprimée dans l'équation (B). Il suit de là que si l'on suppose diverses valeurs au contre-poids, il en résultera aussi diverses valeurs de l'', et, par suite, diverses valeurs pour l'effet utile maximum de la machine. Parmi toutes les valeurs qu'on peut ainsi donner au contre-poids, il doit donc y en avoir une qui rendra cet effet utile maximum le plus grand possible avec la détente fixée, et, par conséquent, il convient d'en fixer la détermination. C'est pourquoi nous allons chercher d'abord quelle est la valeur de l'' qui remplit la condition voulue ; puis, nous chercherons ensuite quel est le contre-poids qui correspond à cette valeur de l'', et, par ce moyen, nous arriverons à la solution complète de la question.

Pour cela, il faut former l'expression de l'effet utile maximum de la machine avec une valeur quelconque de l'', et chercher quelle est la valeur particulière de cette quantité qui rendra cet effet utile un maximum pour la détente fixée. Or, l'effet utile maximum s'obtient en multipliant l'une par l'autre les deux équations (5) et (6), et a pour expression

$$ar'v' = \frac{mS}{1+\delta}\cdot\frac{l+2c}{l''+c}\left[k' - \frac{l}{l'+c}\cdot\frac{n+p+f'+(1+\delta)f''}{n+P}\right] - mS\frac{l+2c}{l''+c}k''.$$

De plus, en ôtant le facteur mS, commun aux deux termes, et remplaçant k'' par sa valeur, le second membre de cette équation devient

$$\frac{1}{1+\delta}\cdot\frac{l+2c}{l''+c}\left[k' - \frac{l}{l'+c}\cdot\frac{n+p+f'+(1+\delta)f''}{n+P}\right]$$
$$-\frac{l-l''+c}{l''+c}\log\frac{l-l''+c}{c} + \log\frac{l+c}{l''+c}.$$

C'est, par conséquent, la quantité dont nous devons chercher le maximum. Mais, en en prenant la différentielle par rapport à l'' considérée comme variable, puis égalant le coefficient différentiel à zéro, on obtient

$$\log\frac{l-l''+c}{c} = \frac{k'}{1+\delta} - \frac{1}{1+\delta}\cdot\frac{l}{l'+c}\cdot\frac{n+p+f'+(1+\delta)f''}{n+P}. \qquad (7)$$

Donc, enfin, cette relation exprime la condition qui rend l'effet utile un maximum pour la détente donnée.

Ainsi, quand la détente $\frac{l'}{l}$ est donnée dans une machine, la clôture la plus avantageuse de la soupape d'équilibre, dans la course montante, est déterminée par la condition qui précède; c'est-à-dire qu'il faut alors calculer d'abord k, ou le prendre dans les Tables que nous donnerons un peu plus loin; puis on en retranchera la quantité

$$\frac{l}{l'+c}\cdot\frac{n+p+f'+(1+\delta)f''}{n+P};$$

et, divisant la différence par $(1+\delta)$, on regardera le résultat comme exprimant un logarithme hyperbolique dont le nombre, cherché dans les Tables de ce système, sera la quantité

$$\frac{l-l''+c}{c}.$$

Si l'on n'a pas de Tables de logarithmes hyperboliques, on divisera le résultat obtenu par le nombre 2.303, et le quotient étant cherché dans les Tables de logarithmes ordinaires, fera connaître la quantité $\frac{l-l''+c}{c}$. Il sera bien facile, par conséquent, d'en déduire $\frac{l''}{l}$.

Cette première recherche fait connaître la valeur de $\frac{l''}{l}$ qui remplit la condition voulue. Maintenant, pour en déduire le contre-poids correspondant, il suffit de recourir à l'équation (B), en y introduisant la condition $P'=P$ qui, comme nous l'avons vu, convient au cas considéré, c'est-à-dire à la production de l'effet utile maximum. Cette équation donne alors

$$\Pi=\frac{l'+c}{l}(n+P)k''+f''+\rho''. \qquad (8)$$

Ainsi, l'on voit que, dès que la quantité $\frac{l''}{l}$ sera connue par la formule (7), il suffira de calculer ou de chercher k'' dans les Tables; et en substituant sa valeur dans l'équation (8), on en déduira immédiatement le contre-poids que doit avoir la machine pour remplir la condition voulue.

Si cependant il arrive que le contre-poids déterminé par cette recherche présente des inconvéniens dans la pratique, il est clair qu'on devra se borner à choisir celui qui s'en écartera le moins possible.

§ VII. *De la détente qui produit le maximum absolu d'effet utile.*

Jusqu'ici nous avons supposé la détente donnée à priori, et nous avons obtenu l'expression des effets correspondans de la machine. Mais, maintenant, il est évident qu'au lieu de fixer arbitrairement la valeur de cette détente, on peut la déterminer de telle façon qu'elle fasse produire à la machine son plus grand effet utile possible, et ce sera alors le maximum *absolu* d'effet utile dont elle est capable.

Pour cela, il faut recourir à l'expression de l'effet utile maximum de la machine avec une détente quelconque, et chercher quelle est la détente qui lui donnera sa plus grande valeur. Or, cet effet utile a pour expression

$$ar'v'=\frac{mS}{1+\delta}\cdot\frac{l+2c}{l''+c}\left[k'-\frac{l}{l'+c}\cdot\frac{n+p+f'+(1+\delta)f''}{n+P}\right]-mS\frac{l+2c}{l''+c}k'';$$

ou bien, en remplaçant k' par sa valeur,

$$ar'v' = \frac{mS}{1+\delta} \cdot \frac{l+2c}{l''+c}\left[\frac{l'}{l'+c} + \log \frac{l+c}{l'+c} - \frac{l}{l'+c} \cdot \frac{n+p+f'+(1+\delta)f''}{n+P}\right] - mS\frac{l+2c}{l''+c}k''.$$

C'est donc l'expression dont nous devons chercher le maximum. Mais, si l'on remarque que, dans ces machines, on ferme toujours la soupape d'équilibre très-près de la fin de la course du piston, on reconnaîtra qu'on peut supposer approximativement $l'' = l$, et, par conséquent, $k'' = 0$: alors, l'expression précédente devient entièrement semblable à celle que nous avons obtenue dans une recherche pareille, chap. IV, art. IV, § I, pour les machines à double action; et, par conséquent, on reconnaît par analogie que son maximum est donné par la condition

$$\frac{l'}{l} = \frac{n+p+f'+(1+\delta)f''}{n+P}. \qquad (9)$$

Cette expression fera donc connaître la détente la plus avantageuse à la machine.

Il faut cependant observer que, comme cette solution n'a été obtenue qu'en supposant $l'' = l$, ce qui n'est pas tout-à-fait exact, on ne devra la considérer que comme une approximation; et si l'on veut résoudre la question d'une manière tout-à-fait précise, il faudra procéder par tâtonnement. C'est-à-dire qu'après avoir calculé l'effet utile de la machine avec cette détente, on le calculera également avec une détente un peu plus grande et un peu plus petite, et si l'on trouve que, par ce changement, l'effet utile augmente d'une manière sensible, on continuera de faire varier la détente dans le même sens jusqu'à ce qu'on arrive au maximum cherché. Pour procéder directement, et, par conséquent, pour éviter ces tâtonnemens, il faudrait, dans la valeur précédente de $ar'v'$, substituer, pour l'' et k'', leur valeur en fonction de l', donnée par l'équation (7); mais, comme celle-ci est une fonction transcendante qu'on ne pourrait résoudre qu'approximativement; le mode qu'on vient d'indiquer nous paraît le plus simple et le plus praticable.

En définitive, donc, pour déterminer les conditions propres à faire produire à une machine son plus grand effet possible, il faut d'abord calculer la détente de l'équation (9); puis ensuite, en introduisant cette détente dans l'équation (7), on aura la valeur de l'' ou la clôture la plus favorable de la soupape d'équilibre. Celle-ci étant introduite avec l' dans l'équation (8), fera connaître le contre-poids correspondant; et, enfin, en substituant pour l' et l'' leur valeur dans l'équation (5), on déterminera la charge que doit avoir la machine pour correspondre aux effets voulus. Alors, en donnant à la machine la détente, le contre-poids et la charge ainsi fixés, on lui fera produire le plus grand effet utile dont elle est capable.

Cependant, il doit toujours être entendu que si le contre-poids, la charge ou la

détente résultant de ce calcul offrent des inconvéniens dans la pratique, on devra se borner à adopter les valeurs qui s'en écartent le moins possible. Ainsi, par exemple, la valeur de $\frac{l'}{l}$ donnée par l'équation (9) est, en général, beaucoup plus petite qu'il n'est admissible dans le travail des machines, parce que le mouvement du piston devient trop inégal quand on ne laisse pénétrer la vapeur dans le cylindre que pendant une très-petite portion de la course du piston. Par ce premier motif, on ne trouve guère possible d'adopter une valeur de $\frac{l'}{l}$ au-dessous de 0.50 ou 0.33. En outre, si l'on employait une valeur de $\frac{l'}{l}$ trop petite, il en résulterait pour la machine une vitesse trop grande, et qui pourrait être nuisible à son travail ou à sa conservation. Enfin, comme l'emploi d'une certaine détente limite nécessairement la charge maximum de la machine, il pourra arriver encore que l'on ne puisse employer une détente inférieure à un certain degré, parce que sans cela la machine ne pourrait soulever sa charge, qui se trouve fixée par la dimension des pompes et la profondeur du puits; et cette considération peut encore contraindre à augmenter la valeur de l'. Par tous ces motifs donc, on voit qu'on pourra être restreint dans le choix des données les plus favorables au travail; mais une fois ces conditions satisfaites, le travail le plus avantageux de la machine sera toujours produit par les déterminations qui s'approcheront le plus des résultats du calcul.

§ VIII. *Tables pour la solution numérique des formules, pour les machines à simple action.*

Comme les formules que nous avons données dans les paragraphes précédens contiennent des expressions logarithmiques dont la formation entraîne quelques longueurs, nous joignons ici deux tables qui en donneront la valeur sans calcul.

La première de ces tables est relative à la course descendante du piston, et la seconde à la course montante. Les correspondances entre les nombres des diverses colonnes feront immédiatement connaître, soit la valeur de k' quand $\frac{l'}{l}$ sera donnée, soit, au contraire, la valeur de $\frac{l'}{l}$, quand ce sera k' qui sera connu. Il en sera de même relativement à $\frac{l''}{l}$ et k''.

Dans les tables que nous allons donner, nous avons supposé d'abord $c = 0.1\ l$; c'est-à-dire que nous avons pris la liberté du cylindre, passages aboutissans compris, comme égale au dixième de la course utile du piston. Cette proportion est effectivement adoptée en général dans les machines de Watt à simple action, afin

d'éviter les accidens qui pourraient arriver si le piston, en continuant sa course un peu trop loin, venait à frapper le fond du cylindre. Cependant, pour comprendre les machines qui s'écartent de cette proportion, ainsi que les machines de Cornwall à simple action, dont nous parlerons un peu plus loin, nous avons également calculé la table pour le cas de $c = 0.05l$ et $c = 0.15l$.

Nous devons rappeler ici que les quantités l' et l'' sont les longueurs parcourues par le piston, au moment où l'on intercepte les communications de la vapeur ; et, par conséquent, que ces longueurs sont supposées mesurées à compter du point de départ effectif du piston dans le cylindre, et non à compter de l'extrémité même du cylindre.

TABLE POUR LA SOLUTION NUMÉRIQUE DES FORMULES.

(MACHINES DE WATT ET DE CORNWALL A SIMPLE ACTION).

N°. II.

PORTION DE LA COURSE descendante parcourue avant la détente, ou valeur de la fraction $\frac{l'}{l}$.	VALEUR CORRESPONDANTE de k', ou de l'expression $\left(\frac{l'}{l'+c} + \log \frac{l+c}{l'+c}\right)$.			PORTION DE LA COURSE descendante parcourue avant la détente, ou valeur de la fraction $\frac{l'}{l}$.	VALEUR CORRESPONDANTE de k', ou de l'expression $\left(\frac{l'}{l'+c} + \log \frac{l+c}{l'+c}\right)$.		
	$\frac{c}{l} = 0.05$.	$\frac{c}{l} = 0.10$.	$\frac{c}{l} = 0.15$.		$\frac{c}{l} = 0.05$.	$\frac{c}{l} = 0.10$.	$\frac{c}{l} = 0.15$.
0.10	2.613	2.205	1.926	0.53	1.507	1.399	1.304
0.11	2.569	2.180	1.910	0.54	1.491	1.385	1.293
0.12	2.527	2.155	1.894	0.55	1.476	1.372	1.282
0.13	2.485	2.130	1.877	0.56	1.461	1.359	1.271
0.14	2.446	2.105	1.861	0.57	1.445	1.347	1.260
0.15	2.408	2.082	1.844	0.58	1.431	1.334	1.249
0.16	2.371	2.058	1.827	0.59	1.417	1.321	1.238
0.17	2.336	2.033	1.810	0.60	1.402	1.309	1.227
0.18	2.301	2.012	1.794	0.61	1.388	1.297	1.216
0.19	2.268	1.988	1.778	0.62	1.374	1.285	1.205
0.20	2.235	1.966	1.761	0.63	1.361	1.273	1.195
0.21	2.203	1.944	1.744	0.64	1.347	1.261	1.185
0.22	2.173	1.922	1.728	0.65	1.334	1.250	1.175
0.23	2.142	1.901	1.712	0.66	1.321	1.238	1.165
0.24	2.114	1.880	1.696	0.67	1.308	1.227	1.155
0.25	2.085	1.859	1.680	0.68	1.295	1.215	1.145
0.26	2.059	1.839	1.665	0.69	1.282	1.204	1.135
0.27	2.032	1.819	1.650	0.70	1.269	1.193	1.126
0.28	2.006	1.790	1.635	0.71	1.257	1.183	1.117
0.29	1.980	1.781	1.620	0.72	1.245	1.172	1.108
0.30	1.955	1.762	1.605	0.73	1.233	1.161	1.099
0.31	1.931	1.743	1.590	0.74	1.221	1.151	1.090
0.32	1.908	1.725	1.575	0.75	1.209	1.140	1.081
0.33	1.884	1.707	1.561	0.76	1.197	1.130	1.069
0.34	1.862	1.689	1.547	0.77	1.186	1.120	1.060
0.35	1.840	1.672	1.533	0.78	1.175	1.110	1.051
0.36	1.818	1.654	1.519	0.79	1.164	1.100	1.042
0.37	1.797	1.637	1.505	0.80	1.153	1.090	1.033
0.38	1.776	1.621	1.491	0.81	1.142	1.080	1.024
0.39	1.755	1.605	1.478	0.82	1.131	1.070	1.015
0.40	1.735	1.588	1.465	0.83	1.120	1.060	0.006
0.41	1.716	1.573	1.452	0.84	1.109	1.050	0.997
0.42	1.697	1.557	1.439	0.85	1.099	1.041	0.988
0.43	1.678	1.542	1.426	0.86	1.088	1.032	0.980
0.44	1.660	1.526	1.413	0.87	1.078	1.023	0.972
0.45	1.642	1.511	1.400	0.88	1.067	1.014	0.964
0.46	1.624	1.496	1.388	0.89	1.057	1.005	0.956
0.47	1.606	1.482	1.376	0.90	1.047	0.996	0.948
0.48	1.589	1.468	1.364	0.91	1.037	0.987	0.940
0.49	1.572	1.453	1.352	0.92	1.027	8.978	0.932
0.50	1.555	1.439	1.340	0.93	1.017	0.969	0.924
0.51	1.539	1.426	1.328	0.94	1.007	0.960	0.916
0.52	1.523	1.412	1.316	0.95	1.000	0.951	0.908

TABLE POUR LA SOLUTION NUMÉRIQUE DES FORMULES.

(MACHINES DE WATT ET DE CORNWALL A SIMPLE ACTION).

N°. III.

PORTION DE LA COURSE montante parcourue avant la clôture de la soupape d'équilibre, ou valeur de la fraction $\frac{l''}{l}$.	VALEUR CORRESPONDANTE de k'', ou de l'expression $\left(\frac{l-l''+c}{l+2c}\log\frac{l-l''+c}{c}-\frac{l''+c}{l+2c}\log\frac{l+c}{l''+c}\right)$.			PORTION DE LA COURSE montante parcourue avant la clôture de la soupape d'équilibre, ou valeur de la fraction $\frac{l''}{l}$.	VALEUR CORRESPONDANTE de k'', ou de l'expression $\left(\frac{l-l''+c}{l+2c}\log\frac{l-l''+c}{c}-\frac{l''+c}{l+2c}\log\frac{l+c}{l''+c}\right)$.		
	$\frac{c}{l}=0.05.$	$\frac{c}{l}=0.10.$	$\frac{c}{l}=0.15.$		$\frac{c}{l}=0.05.$	$\frac{c}{l}=0.10.$	$\frac{c}{l}=0.15.$
0.50	0.876	0.593	0.448	0.76	0.272	0.171	0.123
0.51	0.848	0.573	0.432	0.77	0.254	0.159	0.114
0.52	0.821	0.554	0.417	0.78	0.236	0.147	0.105
0.53	0.794	0.534	0.402	0.79	0.219	0.135	0.096
0.54	0.768	0.515	0.387	0.80	0.202	0.124	0.088
0.55	0.742	0.496	0.372	0.81	0.186	0.113	0.080
0.56	0.716	0.478	0.358	0.82	0.170	0.103	0.073
0.57	0.691	0.460	0.344	0.83	0.155	0.093	0.066
0.58	0.666	0.442	0.330	0.84	0.140	0.084	0.059
0.59	0.641	0.424	0.316	0.85	1.126	0.075	0.052
0.60	0.616	0.407	0.303	0.86	0.112	0.066	0.046
0.61	0.591	0.390	0.290	0.87	0.099	0.058	0.040
0.62	0.567	0.373	0.277	0.88	0.086	0.050	0.035
0.63	0.543	0.357	0.264	0.89	0.074	0.043	0.030
0.64	0.520	0.341	0.252	0.90	0.063	0.036	0.025
0.65	0.497	0.325	0.240	0.91	0.053	0.030	0.020
0.66	0.475	0.309	0.228	0.92	0.043	0.024	0.016
0.67	0.454	0.294	0.216	0.93	0.034	0.019	0.012
0.68	0.452	0.279	0.205	0.94	0.026	0.014	0.009
0.69	0.411	0.264	0.194	0.95	0.019	0.010	0.006
0.70	0.390	0.250	0.183	0.96	0.012	0.006	0.004
0.71	0.369	0.236	0.172	0.97	0.007	0.003	0.002
0.72	0.349	0.222	0.162	0.98	0.003	0.002	0.001
0.73	0.329	0.208	0.152	0.99	0.001	0.001	0.000
0.74	0.310	0.195	0.142	1.00	0.000	0.000	0.000
0.75	0.291	0.183	0.132				

ARTICLE III.

FORMULES PRATIQUES POUR LE CALCUL DES MACHINES DE WATT A SIMPLE ACTION, ET EXEMPLE DE LEUR APPLICATION.

Pour former les équations numériques propres au calcul de ces machines, il faut observer que, puisqu'on y emploie la condensation, la valeur des constantes m et n du volume spécifique de la vapeur doit être, en mesures anglaises,

$$m = 4{,}100{,}000\,,$$
$$n = 250.$$

Quant à la pression absolue de la vapeur dans la chaudière, elle est, en général, comprise entre 15 et 18 livres par pouce carré. Ainsi, l'on aura moyennement

$$P = 16.5 \times 144 \text{ lbs. par pied carré.}$$

La pression p subsistant, non dans le condenseur, mais dans le cylindre à vapeur lui-même, après condensation imparfaite de la vapeur, varie considérablement dans les différentes machines, selon la perfection de leur construction. C'est pourquoi on ne peut la connaître exactement que par l'observation de l'*indicateur* appliqué au cylindre lui-même, ou au moins par le manomètre appliqué au condenseur. Dans la plupart des cas, on ne pousse la condensation que jusqu'à la pression d'environ 1.25 livre par pouce carré, dans le condenseur, ce qui correspond à-peu-près à 4 livres par pouce carré dans le cylindre à vapeur. Cependant, il arrive souvent aussi que l'abondance d'eau froide, dans les machines d'épuisement, permet de réduire la pression du condenseur à 0.75 livre par pouce carré, et, dans ce cas, la pression dans le cylindre peut descendre à deux livres par pouce carré environ. La valeur de p variera donc entre ces limites, mais on aura plus généralement

$$p = 4 \times 144 \text{ lbs. par pied carré.}$$

Pour avoir tous les élémens du calcul, il faudrait encore connaître la valeur précise des frottemens f', f'' et δ, afin de la substituer dans les équations algébriques déjà obtenues. A cet égard, nous manquons d'expériences spéciales en nombre suffisant. Cependant, en continuant d'assimiler les machines de Watt à simple action à celles de Watt à double action, on doit remarquer qu'il y a bien peu de différence entre elles sous le rapport du frottement proprement dit, car les premières ont de moins quelques pièces, savoir : le volant, la manivelle et l'arbre de couche; mais elles ont de plus le contre-poids qui remplace les pièces supprimées; et, à l'égard des pompes de service, dont le travail est compris dans le frottement, il n'y a de différence que pour la pompe d'air. Or, le travail de cette pompe consiste d'abord à enlever du condenseur l'eau qui y a été injectée; et, en outre, pendant tout le temps que cette eau met à s'écouler dans le réservoir d'eau chaude, il faut que le piston de la

pompe d'air surmonte la résistance de la pression atmosphérique diminuée de celle du condenseur. En prenant l'eau d'injection à la surface du sol, le travail de la pompe d'air excède donc celui des deux autres pompes, de tout l'effort nécessaire pour exécuter cette seconde action ; et celle-ci est d'autant plus grande que l'injection d'eau froide est plus considérable, puisqu'il en résulte plus de durée dans son écoulement et une moindre pression sous le piston de la pompe. Quand la pression du condenseur est de 1.25 livre par pouce carré, la résistance de la pompe d'air peut s'élever à-peu-près au quart du frottement total. Ainsi, en observant que cette pompe est mise en jeu dans la course montante, et les deux autres pompes dans la course contraire, et se reportant à ce qui a été dit chap. VII, art. II, § I, c'est-à-dire en représentant par d le diamètre du cylindre de la machine exprimée en pieds, et par f' et f'' le frottement, dans chacune des deux courses, exprimé en livres par pied carré de la surface du piston à vapeur, on aura approximativement

$$f' = \frac{250}{d}, \quad f'' = \frac{350}{d}.$$

La valeur moyenne du frottement dans les deux courses restera alors la même que dans une machine de Watt à double action ordinaire. Mais si, au moyen d'une injection plus considérable d'eau froide, on réduit la pression dans le condenseur au-dessous de 1.25 livre par pouce carré, alors la valeur de f' et surtout celle de f'' subiront des augmentations de plus en plus considérables, sans que nous puissions les fixer d'une manière précise.

A cet égard, nous devons citer ici que, dans une expérience faite par M. Wicksteed, et que nous rapporterons plus loin, le frottement d'une machine de Watt à simple action, à cylindre de 5 pieds de diamètre, a été trouvé, dans les deux courses, de 87 et 269 livres par pied carré. Mais comme, dans cette machine, la pression du condenseur était réduite à 0.49 livre par pouce carré, et que les nombres obtenus comprennent le frottement de la pompe d'épuisement, qui ne fait pas réellement partie du frottement de la machine, ainsi que le choc produit à la fin de la course montante qui n'a lieu que lorsqu'on arrête le piston sans fermer la soupape d'équilibre, nous préférons faire connaître ces résultats comme renseignemens, que de les admettre comme données ordinaires.

Relativement à la quantité δ, ou au frottement additionnel dû à la charge, nous avons fait remarquer déjà plusieurs fois que, dans les divers systèmes de machines, cette quantité ne doit suivre que des variations analogues à celles du frottement de la machine sans charge, puisque ces deux frottemens dépendent également de la complication des pièces propres au système de la machine. Dans le cas qui nous occupe, nous laisserons donc à la quantité δ la même valeur que nous lui avons attribuée jusqu'ici; c'est-à-dire que nous ferons, jusqu'à déterminaison spéciale,

$$\delta = 0.14.$$

Enfin, dans ces machines comme dans les précédentes, nous évaluerons à 0.05 de la vaporisation totale la quantité d'eau enlevée à l'état liquide avec la vapeur.

Les formules numériques se formeront en substituant, dans les équations algébriques, la valeur des constantes. Cependant, comme la pression dans la chaudière varie dans les différentes machines, ainsi que la pression de condensation, et que les évaluations que nous venons de donner des frottemens ne sont que temporaires, nous n'introduirons dans les équations numériques que les valeurs de m et n. Alors elles produiront les formules suivantes.

Formules pratiques pour les machines de Watt à simple action.
(mesures anglaises)

CAS D'UNE CHARGE OU D'UNE VITESSE QUELCONQUES, AVEC UN CONTRE-POIDS ET UNE DÉTENTE DONNÉES, QUELCONQUES.

$$v = 4{,}100{,}000\,\frac{S}{a}\cdot\frac{l+2c}{l''+c}\cdot\frac{k'-(1+\delta)k''}{(1+\delta)r+250+p+f'+(1+\delta)f''}.$$

Vitesse du piston, en pieds, par minute.

$$ar = 4{,}100{,}000\,\frac{S}{v}\cdot\frac{l+2c}{l''+c}\left(\frac{k'}{1+\delta}-k''\right)-\frac{a}{1+\delta}\left[250+p+f'+(1+\delta)f''\right].$$

Charge utile du piston, en livres.

$$S = \frac{av}{4{,}100{,}000}\cdot\frac{l''+c}{l+2c}\cdot\frac{(1+\delta)r+250+p+f'+(1+\delta)f''}{k'-(1+\delta)k''}.$$

Vaporisation effective, en pieds cubes d'eau, par minute.

$\text{E. u.} = arv$ . . . . Effet utile, en livres élevées à 1 pied, par minute.

$\text{E. u. ch.} = \frac{arv}{33000}$ . . . . Effet utile, en chevaux.

$\text{E. u. 1 lb. co.} = \frac{arv}{N}$ . . . . Effet utile de 1 livre de combustible, en livres élevées à 1 pied.

$\text{E. u. 1 p. e.} = \frac{arv}{S}$ . . . . Effet utile de 1 pied cube d'eau vaporisé, en livres élevées à 1 pied.

$\text{Q. co. pr. 1 ch.} = \frac{33000\,N}{arv}$ . . . . Quantité de combustible, en livres, qui produit l'effet d'un cheval.

$\text{Q. e. pr. 1 ch.} = \frac{33000\,S}{arv}$ . . . . Quantité d'eau, en pieds cubes, qui produit l'effet d'un cheval.

$\text{E. u. ch. pr. 1 lb. co.} = \frac{arv}{33000\,N}$ . . . . Effet utile, en chevaux, produit par livre de combustible.

$\text{E. u. ch. pr. 1 p. e.} = \frac{arv}{33000\,S}$ . . . . Effet utile, en chevaux, produit par pied cube d'eau vaporisé.

CAS DU MAXIMUM D'EFFET UTILE, AVEC UN CONTRE-POIDS ET UNE DÉTENTE DONNÉS QUELCONQUES.

$$v' = 4{,}100{,}000 \frac{l+2c}{l'+c} \cdot \frac{l}{l''+c} \cdot \frac{S}{a} \cdot \frac{1}{250+P}.$$ Vitesse du maximum d'effet utile, en pieds, par minute.

$$ar' = a\frac{l'+c}{l}\left(\frac{k'}{1+\delta} - k''\right)(250+P) - \frac{a}{1+\delta}[250+p+f'+(1+\delta)f''].$$

Charge du maximum d'effet utile, en livres.

$$S = \frac{av'}{4{,}100{,}000} \cdot \frac{l'+c}{l+2c} \cdot \frac{l''+c}{l} \cdot (250+P).$$ Vaporisation effective, en pieds cubes d'eau, par minute.

E. u. max. $= ar'v'$. . . . . Effet utile maximum, en livres élevées à 1 pied, par minute.

CONTRE-POIDS QUI PRODUIT LE MAXIMUM D'EFFET UTILE, AVEC UNE DÉTENTE DONNÉE QUELCONQUE.

$$\log \frac{l - l'' + c}{c} = \frac{k'}{1+\delta} - \frac{1}{1+\delta} \cdot \frac{l}{l'+c} \cdot \frac{250+p+f'+(1+\delta)f''}{250+P}.$$

Condition qui fixe la clôture la plus favorable de la soupape d'équilibre, ou la valeur de $\frac{l''}{l}$.

$$\Pi = \frac{l'+c}{l}(250+P)k'' + f'' + p''.$$ . . . Contre-poids correspondant, en livres, par pied carré de la surface du piston.

DÉTENTE QUI PRODUIT LE MAXIMUM ABSOLU D'EFFET UTILE.

$$\frac{l'}{l} = \frac{250+p+f'+(1+\delta)f''}{250+P}.$$ . . . . Détente approximative du maximum absolu d'effet utile.

Les quantités k' et k'' contenues dans ces formules sont des fonctions de l' et de l'', que l'on trouvera toutes calculées dans les Tables que nous avons données un peu plus haut; mais, si l'on n'a pas ces Tables sous les yeux, on pourra en trouver facilement la valeur, ainsi qu'il a été expliqué § III, art. II de ce chapitre.

Pour montrer maintenant une application de ces formules, nous calculerons les effets que devait produire la machine de ce système, établie à Old-ford, *East London Waterworks*, et soumise, par M. Wicksteed, à une expérience dont la durée a été de 38.5 heures, et dans laquelle cet habile ingénieur a développé une exactitude qui rend ses observations tout-à-fait précieuses pour la science. (Voyez : *An experimental enquiry concerning the Cornish and Watt pumping engines*, *by* Thomas Wicksteed. *John Weale*, *London*, 1841).

La machine présente les dimensions et données suivantes :

Diamètre du cylindre, 60 pouces; ou surface du piston, tige déduite, $a = 19.507$ pieds carrés.

Course du piston, $l = 7.91$ pieds.

Portion de la course descendante parcourue avant la détente, 5 pieds, ou $\frac{l'}{l} = 0.63$.

Portion de la course montante parcourue au moment de la clôture de la soupape d'équilibre, 7.91 pieds, ou $\frac{l''}{l} = 1$, le piston étant arrêté par l'admission de la vapeur dans le cylindre.

Liberté moyenne du cylindre au sommet et au bas du cylindre, $\frac{1}{10}$ de la course totale, ou $\frac{c}{l} = 0.1$.

Pression absolue de la vapeur dans la chaudière, 17.70 livres par pouce carré, ou $P = 2549$ livres par pied carré.

Pression absolue dans le condenseur, 0.49 livre par pouce carré, ou dans le cylindre à vapeur, selon l'évaluation indiquée plus haut, 1.57 lb par pouce carré; ce qui donne $p = 226$ livres par pied carré.

Vaporisation observée dans la chaudière, 182,307 livres d'eau en 58.5 heures; ce qui, après déduction de l'eau condensée dans l'enveloppe extérieure du cylindre et mesurée directement, donne une vaporisation brute de 0.813 pied cube d'eau par minute, et, en en retranchant, selon notre évaluation, $\frac{1}{20}$ pour l'eau entraînée à l'état liquide avec la vapeur, donne, pour la vaporisation *effective*, $S = 0.772$ pied cube d'eau par minute.

Consommation de houille de première qualité du pays de Galles, 1 livre pour 8.301 livres d'eau vaporisée; ce qui fait 6.257 livres de houille par minute, ou $N = 6.257$.

Contre-poids, ou prépondérance du balancier, du côté opposé au cylindre, 2.120 livres par pouce carré de la surface du piston, ou $\Pi = 305$ livres par pied carré.

Charge de la pompe préparatoire, ou pompe foulante mise en jeu dans la course montante du piston à vapeur, 0.25 livre par pouce carré de la surface du piston, ou $\rho'' = 0.25 \times 144$ lbs par pied carré.

Frottement de la machine sans charge, et non compris le travail de ses pompes de service, 0.483 livre par pouce carré de la surface du piston (*); et, en y ajoutant pour la pompe d'eau froide 0.104 livre, et pour la pompe d'eau chaude 0.019 livre, selon les mesures prises directement, fait en tout 0.606 livre par pouce carré; ce qui donne pour le frottement total de la machine sans charge, dans la course descen-

---

(*) Pour obtenir ce frottement, M. Wicksteed a pris exactement la valeur du contre-poids, ou prépondérance du balancier du côté opposé au piston; puis, comme la course montante n'est exécutée que par cette prépondérance, il en a retranché la force nécessaire pour l'action de la pompe préparatoire et de la pompe d'air, et le reste a donné une évaluation approchée du frottement. Mais, comme, pour éteindre l'action du contre-poids, il y avait, outre le frottement propre de la machine, le choc produit par l'admission anticipée de la vapeur contre le piston, avant la fin de la course montante, ainsi que le frottement du piston de la pompe d'épuisement et la résistance de l'eau, au passage des clapets, avec une vitesse quadruple de celle de la machine, on voit que le nombre obtenu serait trop fort pour représenter le frottement seul de la machine, et qu'on ne doit l'admettre que pour la machine soumise à l'expérience et en y comprenant les résistances ci-dessus. La résistance de la pompe d'air donnée un peu plus loin parait également plus considérable que d'ordinaire.

dante, $f' = 87$ livres par pied carré; et, dans la course montante, en y ajoutant pour la pompe d'air 1.388 livre par pouce carré, donne pour le frottement dans cette course $f'' = 269$ lbs.

Dans les conditions précédentes, la machine soumise à l'expérience a donné 39,901 coups de piston en 58.5 heures, ce qui fait une vitesse de 89.92 pieds par minute; et la masse d'eau élevée par les pompes, et vérifiée par mesure directe, formait une charge de 9.235 livres par pouce carré de la surface du piston.

Avec ces données nous allons donc chercher quels sont les effets que devait produire cette machine.

En substituant, dans les formules, les valeurs données plus haut, supposant la machine réglée comme elle l'était dans l'expérience, c'est-à-dire avec la détente $\frac{l'}{l} =$ 0.63, le contre-poids de 2.120 livres par pouce carré, et, en outre, la soupape d'équilibre fermée à la fin seulement de la course descendante, ou $l'' = l$; puis, cherchant, d'après l'équation (2), la charge que la machine devait soulever à la vitesse de 90 pieds par minute, on obtient d'abord les résultats contenus dans le tableau suivant.

Effets de la machine, avec la détente, la clôture de la soupape d'équilibre et le contre-poids fixés.

$$\frac{l'}{l} = 0.63, \qquad \frac{l''}{l} = 1, \qquad \frac{\Pi}{144} = 2,120.$$

v.	= 90
ar.	= 27,143
$\frac{r}{144}$.	= 9.663
S.	= 0.772
E. u.	= 2,442,870
E. u. ch.	= 74
E. u. 1 lb. co. . . .	= 390,430
E. u. 1. p. e.	= 3,164,300
Q. co. pr. 1. ch. . .	= 0.85
Q. e. pr. 1 ch. . . .	= 0.0104
E. u. ch. pr. 1 lb. co.	= 11.85
E. u. ch. pr. 1 p. e..	= 95.89

Ensuite, en supposant la machine réglée à divers degrés de détente, et cherchant pour chacune de ces détentes, d'abord la clôture la plus favorable de la soupape d'équilibre d'après l'équation (7), puis le contre-poids correspondant de la machine d'après l'équation (8), ensuite la charge ou la vitesse la plus avantageuse pour la machine avec cette détente et cette clôture de la soupape d'équilibre, d'après les

équations (6) et (5); enfin, cherchant, comme il a été expliqué, parmi toutes les détentes qu'on peut supposer à la machine, celle qui lui fera produire son maximum absolu d'effet utile, et, calculant les effets de la machine, dans chacun des cas supposés, on obtient les résultats contenus dans le tableau suivant.

Effets de la machine avec diverses détentes, et avec le contre-poids et la charge le plus convenables à chacun de ces détentes respectives.

			Maximum d'effet utile.
$\frac{l'}{l}$	= 0.63	... 0.50	... 0.29
$\frac{l''}{l}$	= 0.88	... 0.87	... 0.85
$\frac{\text{n}}{144}$	= 2.81	... 2.77	... 2.66
v'	= 94.72	... 116.90	... 185.35
ar'	= 27,806	... 24,816	... 17,314
$\frac{r'}{144}$	= 9.899	... 8.834	... 6.164
S.	= 0.772	... 0.772	... 0.772
E. u.	= 2,635,720	... 2,901,100	... 3,174,240
E. u. ch.	= 80	... 88	... 96
E. u. 1 lb. co.	= 420,930	... 463,660	... 507,320
E. u. 1 p. e.	= 3,411,500	... 3,757,900	... 4.111,700
Q. co. pr. 1 ch.	= 0.078	... 0.071	... 0.065
Q. e. pr. 1 ch.	= 0.0097	... 0.0088	... 0.0080
E. u. ch. pr. 1 lb. co.	= 12.76	... 14.05	... 15.37.
E. u. ch. pr. 1 p. e.	= 103.40	... 113.90	... 124.60

En jetant les yeux sur le premier de ces tableaux, on trouve que la machine étant réglée comme dans l'expérience, devait, à la vitesse de 90 pieds par minute, élever une charge de 9.663 livres par pouce carré du piston. Or, l'expérience a donné, pour cette vitesse, une charge de 9.235 livres par pouce carré. On voit donc d'abord qu'il y a un accord remarquable entre le calcul et l'observation; car on doit remarquer que, si l'on avait des données suffisantes pour évaluer la résistance de l'eau dans les tuyaux d'ascension, cette quantité devrait être soustraite du nombre 9.663 lbs, pour avoir la charge vraiment utile; et, par conséquent, le résultat du calcul s'approcherait encore davantage de celui de l'expérience.

Ensuite, on voit, de plus, que, si le travail de la machine permettait d'y employer une détente plus considérable, et, par conséquent, une charge moins forte, on pourrait, en la réglant à la détente $\frac{l'}{l} = 0.50$, lui donner une force de 88 chevaux environ, et, en la réglant à la détente du maximum absolu d'effet utile,

lui donner une force de 96 chevaux, au lieu de 74 chevaux, qu'elle produit dans son règlement actuel. Néanmoins, comme ces règlemens supposent des charges très-faibles qui peuvent se trouver incompatibles avec l'état actuel des pompes, que l'emploi d'une détente trop considérable et d'une clôture trop prompte de la soupape d'équilibre produirait beaucoup d'irrégularité dans le mouvement, et enfin, qu'une trop grande vitesse du piston serait nuisible à la conservation de la machine elle-même, nous ne citons ce dernier résultat que pour montrer le point dont on doit se rapprocher le plus possible pour le meilleur usage de la machine. Il est entendu, en effet, que parmi les résultats fournis par les formules, on ne peut adopter que ceux qui seraient applicables au cas dont on s'occupe, et qui ne présenteraient pas, du reste, d'inconvéniens dans la pratique.

Pour obtenir les mêmes formules en mesures françaises, il faut observer que les valeurs que nous avons indiquées pour les constantes reviennent aux suivantes :

Constantes du volume de la vapeur,

$$m = 20{,}000{,}000,$$

$$n = 1200.$$

Pression absolue de la vapeur dans la chaudière, P = 11596 kilogrammes par mètre carré.

Pression ordinaire de condensation dans le cylindre, $p = 2810$ kilog. par mètre carré.

Frottement de la machine non chargée, dans la course descendante, pour un cylindre dont le diamètre d est exprimé en mètres, $f' = \frac{375}{d}$ kilogrammes par mètre carré de la surface du piston; et, dans la course montante $f'' = \frac{325}{d}$ kilogrammes par mètre carré.

Frottement additionnel de la machine par unité de la résistance imposée à la machine, $\frac{1}{7}$ de cette résistance, ou $\delta = 0.14$.

Vaporisation effective, ou après déduction de l'eau entraînée à l'état liquide avec la vapeur, 0.95 de la vaporisation brute.

En faisant les substitutions convenables, on obtient les formules suivantes.

Formules pratiques pour les machines de Watt à simple action
(mesures françaises).

CAS D'UNE CHARGE OU D'UNE VITESSE QUELCONQUES, AVEC UN CONTRE-POIDS ET UNE DÉTENTE QUELCONQUES.

$$v = 20{,}000{,}000\,\frac{S}{a}\cdot\frac{l}{l'+c}\cdot\frac{k'-(1+\delta)\,k''}{(1+\delta)\,r+1200+p+f'+(1+\delta)\,f''}.$$

Vitesse du piston, en mètres, par minute.

$$ar = 20{,}000{,}000\,\frac{S}{v}\cdot\frac{l+2c}{l'+c}\left(\frac{k'}{1+\delta}-k''\right)-\frac{a}{1+\delta}\left[1200+p+f'+(1+\delta)\,f''\right].$$

Charge utile du piston, en kilogrammes.

$$S = \frac{av}{20,000,000} \cdot \frac{l'' + c}{l + 2c} \cdot \frac{(1+\delta)r + 1200 + p + f' + (1+\delta)f''}{k' - (1+\delta)k''}.$$

Vaporisation effective, en mètres cubes d'eau, par minute.

$\text{E. u.} = arv.$ . . . . Effet utile, en kilogrammes élevés à 1 mètre, par minute.

$\text{E. u. ch.} = \frac{arv}{4500}.$ . . . . Effet utile, en chevaux.

$\text{E. u. 1 k. co.} = \frac{arv}{N}.$ . . . . Effet utile de 1 kilogramme de combustible, en kil. élevés à 1 mètre.

$\text{E. u. 1 m. e.} = \frac{arv}{S}.$ . . . . Effet utile de 1 mètre cube d'eau, en kilogrammes élevés à 1 mètre.

$\text{Q. co. pr. 1 ch.} = \frac{4500\,N}{arv}.$ . . . . Quantité de combustible, en kilog., qui produit l'effet d'un cheval.

$\text{Q. e. pr. 1 ch.} = \frac{4500\,S}{arv}.$ . . . . Quantité d'eau, en mètres cubes, qui produit l'effet d'un cheval.

$\text{E. u. ch. pr. 1 k. co.} = \frac{arv}{4500\,N}.$ . . . . Effet utile, en chevaux, produit par kilogramme de combustible.

$\text{E. u. ch. pr. 1 m. e.} = \frac{arv}{4500\,S}.$ . . . . Effet utile, en chevaux, produit par mètre cube d'eau vaporisé.

CAS DU MAXIMUM D'EFFET UTILE, AVEC UN CONTRE-POIDS ET UNE DÉTENTE DONNÉS.

$$v' = 20,000,000 \frac{l + 2c}{l' + c} \cdot \frac{l}{l'' + c} \cdot \frac{S}{a} \cdot \frac{1}{1200 + P}.$$

Vitesse du maximum d'effet utile, en mètres, par minute.

$$ar' = a \frac{l' + c}{l} \left(\frac{k'}{1+\delta} - k'' \right) (1200 + P) - \frac{a}{1+\delta} [1200 + p + f' + (1+\delta)f''].$$

Charge du maximum d'effet utile, en kilogrammes.

$$S = \frac{av'}{20,000,000} \cdot \frac{l' + c}{l + 2c} \cdot \frac{l'' + c}{l} (1200 + P).$$

Vaporisation effective, en mètres cubes d'eau, par minute.

$\text{E. u. max.} = ar'v'.$ . . . . Effet utile, en kilogrammes élevés à 1 mètre, par minute.

CONTRE-POIDS QUI PRODUIT LE MAXIMUM D'EFFET UTILE, AVEC UNE DÉTENTE DONNÉE.

$$\log \frac{l - l'' + c}{c} = \frac{k'}{1+\delta} - \frac{1}{1+\delta} \cdot \frac{l}{l' + c} \cdot \frac{1200 + p + f' + (1+\delta)f''}{1200 + P}.$$

Condition qui fixe la clôture de la soupape d'équilibre, ou la valeur de $\frac{l''}{l}$.

$\Pi = \frac{l' + c}{l} (1200 + P) k'' + f'' + \rho''.$ . . . . Contre-poids correspondant, en kilogrammes, par mètre carré de la surface du piston.

DÉTENTE QUI PRODUIT LE MAXIMUM ABSOLU D'EFFET UTILE.

$$\frac{l'}{l} = \frac{1200 + p + f' + (1 + \delta) f''}{1200 + P} \quad \ldots\ldots\ldots \text{Détente du maximum absolu d'effet utile.}$$

Si l'on veut soumettre au calcul la même machine que nous avons citée plus haut, on aura pour ses dimensions :

Diamètre du cylindre, 1.524 mètre, ou surface du piston, tige déduite, $a = 1.812$ mètre carré.

Course totale du piston, $l = 2.410$ mètres.

Portion de la course descendante parcourue avant la détente, 1.524 mètre, ou $\frac{l'}{l} = 0.63$.

Portion de la course montante parcourue au moment de la clôture de la soupape d'équilibre, 2.410 mètres, ou $\frac{l''}{l} = 1$, le piston étant arrêté par l'admission de la vapeur dans le cylindre.

Liberté moyenne du cylindre, au sommet et au bas du cylindre, $\frac{1}{10}$ de la course, ou $\frac{c}{l} = 0.1$.

Pression absolue de la vapeur dans la chaudière, 1.2439 kilogramme par centimètre carré, ou $P = 12439$ kilogrammes par mètre carré.

Pression absolue dans le condenseur, 0.0344 kilogramme par centimètre carré, ou dans le cylindre à vapeur, 0.1103 kilogramme par centimètre carré; ce qui donne $p = 1103$ kilogrammes par mètre carré.

Vaporisation observée dans la chaudière, 82,661 kilogrammes d'eau en 58.5 heures; ce qui, après déduction de l'eau condensée dans l'enveloppe extérieure du cylindre et mesurée directement, donne une vaporisation brute de 0.02301 mètre cube d'eau par minute, et, en en retranchant, selon notre évaluation, $\frac{1}{20}$ pour l'eau entraînée à l'état liquide avec la vapeur, donne pour la vaporisation effective, $S = 0.02187$ mètre cube d'eau par minute.

Consommation de houille de première qualité du pays de Galles, 1 kilogramme pour 8.301 kilogrammes d'eau vaporisée, ce qui fait 2.837 kilogrammes de houille par minute, ou $N = 2.837$.

Contre-poids, ou prépondérance du balancier et des pompes, du côté opposé au cylindre, 0.1490 kilogramme par centimètre carré de la surface du piston, ou $\Pi = 1490$ kilogrammes par mètre carré.

Charge de la pompe préparatoire, ou pompe foulante mise en jeu dans la course montante du piston à vapeur, $\rho'' = 176$ kilogrammes par mètre carré.

Frottement de la machine sans charge et non compris le travail de ses pompes de service, 0.03394 kilogramme par centimètre carré de la surface du piston, et, en y ajoutant, pour la pompe d'eau froide, 0.00731 kilogramme, et pour la pompe d'eau chaude, 0.00133 kilogramme, selon les mesures prises directement, fait en tout, dans la course descendante, 0.0426 kilogramme par centimètre carré, ou $f' = 426$ kilogrammes par mètre carré; et de même, dans la course montante, avec la pompe d'air qui remplace

les deux précédentes et dont la résistance est 0.0975 kilogramme par centimètre carré, $f'' = 1315$ kilogrammes par mètre carré de la surface du piston.

En introduisant ces données dans les formules, conservant d'abord à la machine la détente, le contre-poids et la clôture de la soupape d'équilibre indiqués, et cherchant la charge que, dans ces conditions, la machine devait élever à la vitesse de 27.43 mètres par minute; puis ensuite, supposant qu'on règle la machine à diverses détentes, et qu'on lui donne en même temps le contre-poids, la clôture de la soupape d'équilibre et la charge qui produisent le maximum d'effet utile pour chacune de ces détentes respectives, on obtient les résultats contenus dans les tableaux suivans.

Effets de la machine avec la détente, la clôture de la soupape d'équilibre et le contre-poids fixés.

$$\frac{l'}{l} = 0.63, \qquad \frac{l''}{l} = 1, \qquad \frac{\Pi}{10000} = 0.1490.$$

v	= 27.43
ar	= 12,307
$\frac{r}{10000}$	= 0.679
S.	= 0.02187
E. u.	= 337,590
E. u. ch.	= 75
E. u. 1 k. co. . .	= 119,000
E. u. 1 m. e. . . .	= 15,437,000
Q, co. pr. 1 ch. . .	= 0.033
Q. e. pr. 1 ch. . .	= 0.00029
E. u. ch. pr. 1 k. co.	= 30.24
E. u. ch. pr. 1 m. e.	= 3431

Effets de la machine avec diverses détentes et avec le contre-poids, la clôture de la soupape d'équilibre et la charge le plus convenables à chacune de ces détentes respectives.

			Maximum absolu d'effet utile.
$\frac{l'}{l}$	= 0.63	... 0.50	... 0.29
$\frac{l''}{l}$	= 0.88	... 0.87	... 0.85
$\frac{\Pi}{10000}$	= 0.1975	... 0.1947	... 0.1869
v'	= 28.87	... 35.63	... 55.88
ar'	= 12,608	... 11,252	... 78,504

			Maximum absolu d'effet utile.
$\frac{r'}{10000}$	= 0.696	... 0.621	... 0.433
S.	= 0.02187	... 0.02187	... 0.02187
E. u.	= 363,970	... 400,920	... 438,660
E. u. ch.	= 81	... 89	... 97
E. u. 1 k co.	= 128,300	... 141,320	... 154,630
E. u. 1 m. e.	= 16,643,000	... 18,332,500	... 20,058,600
Q. co. pr. 1 ch.	= 0.031	... 0.028	... 0.025
Q. e. pr. 1 ch.	= 0.00027	... 0.00025	... 0.00022
E. u. ch. pr. 1 k co.	= 32.61	... 35.92	... 39.30
E. u. ch. pr. 1 m. e.	= 3699	... 4074	... 4458

CHAPITRE XII.

MACHINES DE CORNWALL A SIMPLE ACTION,

OU

MACHINES A SIMPLE ACTION, A HAUTE PRESSION, A DÉTENTE ET A CONDENSATION.

ARTICLE I.

DESCRIPTION DE LA MACHINE.

Les machines de Cornwall à simple action sont des machines *à simple action, à haute pression, à détente et à condensation*. Elles diffèrent de celles de Watt à simple action dont nous venons de nous occuper : 1°. en ce que les machines de Cornwall sont à haute pression, c'est-à-dire que la vapeur est élevée dans la chaudière à une pression absolue qui varie de 30 à 60 et même à 80 livres par pouce carré, ou de 2 à 4 ou 5 atmosphères: 2°. en ce que la détente de la vapeur y est portée beaucoup plus loin que dans les machines de Watt, puisqu'on y arrête quelquefois l'admission de la vapeur dans le cylindre, après que le piston a parcouru un dixième seulement de sa course, ce qui n'est praticable qu'à cause de la haute pression initiale de la vapeur ; et 3°. en ce que l'effet utile, ou l'élévation de l'eau dans les pompes d'épuisement, y est produit, non pendant l'action immédiate de la vapeur dans le cylindre, mais pendant la descente du contre-poids.

Dans ces machines, la vapeur est d'abord introduite au-dessus du piston, tandis que le vide est opéré au-dessous, c'est-à-dire, tandis que la partie inférieure du cylindre communique avec le condenseur. L'effort de la vapeur commence donc à faire descendre le piston, en enlevant en même temps un contre-poids considérable, qui n'est autre chose que la partie non équilibrée de la maîtresse tige des pompes d'épuisement, suspendue à l'extrémité opposée du grand balancier. Après que la vapeur a été admise pendant un certain temps dans le cylindre, la soupape d'admission se ferme, et le piston ne continue plus son mouvement que par l'effet de l'impulsion qui lui a été communiquée à l'origine de sa course, et par la détente de la vapeur qui a été interceptée dans le cylindre. La force motrice du mouvement décroissant

donc dès-lors de plus en plus, tandis que la résistance reste la même, le piston diminue rapidement de vitesse, et finit par s'arrêter; mais, si l'on a d'abord admis dans le cylindre une quantité suffisante de vapeur, il est poussé juste au bout de sa course, sans s'arrêter auparavant.

Alors la soupape d'éduction se ferme, et celle d'équilibre s'ouvre. Cette soupape ouvre la communication entre le haut et le bas du cylindre; de sorte que la vapeur se répand aussitôt des deux côtés du piston, et que celui-ci se trouve pressé également sur ses deux faces, ou en équilibre dans la vapeur. Dès ce moment, il n'existe plus aucune force motrice au-dessus du piston, et, comme le contre-poids enlevé pendant l'action de la vapeur presse toujours de tout son poids pour redescendre, il fait remonter le piston et le ramène au sommet du cylindre, en produisant en même temps l'effet utile, c'est-à-dire en produisant l'action des pompes d'épuisement. Quand le piston est parvenu près de la fin de sa course montante, la soupape d'équilibre se referme, et la vapeur interceptée au-dessus du piston se comprime de plus en plus et finit par le ramener au repos : alors les soupapes d'admission et d'éduction s'ouvrent de nouveau par l'action de la cataracte, la machine fournit une nouvelle course descendante, et ainsi de suite.

La *pl.* XX représente une machine de ce système, exécutée sur les dessins de M. W. West, de Saint-Blarey (Cornwall), l'un des ingénieurs les plus renommés pour la construction de ces belles machines. Le cylindre a 80 pouces de diamètre sur une course de piston de 12 pieds. C'est donc une des plus grandes en usage, quoiqu'on en ait fait récemment de dimensions plus considérables encore. Les chaudières sont à foyer intérieur avec tube bouilleur, c'est-à-dire de la forme représentée *pl. III* (*fig.* 21 et 22), et décrite chap. III, § I.

Le cylindre à vapeur est représenté en C. Il est contenu dans une enveloppe métallique *cc*, formant un second cylindre autour du premier, mais laissant entre eux un petit intervalle dans lequel pénètre la vapeur de la chaudière. Cette vapeur y arrive par le tuyau *c*, qui sert en même temps à reconduire à la chaudière l'eau qui a pu s'y former par condensation. En outre, tout ce système est revêtu d'une enveloppe de feutre, ou renfermé dans une caisse en bois assemblée à l'entour et remplie de cendres tamisées. La même précaution est adoptée pour le tube d'apport de la vapeur, ainsi que pour les boîtes à soupapes; enfin, le couvercle du cylindre est surmonté d'un faux couvercle $c'c'$, laissant un intervalle qu'on remplit également de cendres, de sciure de bois, ou d'autres substances peu conductrices du calorique. Par ce moyen, la vapeur ne perd aucune portion de sa chaleur, par radiation, pendant son action dans la machine. Les petits godets c'', c'' servent à faire pénétrer de l'huile dans le cylindre pour graisser le piston. Celui-ci est à garniture de chanvre et entouré d'un anneau compresseur qui permet de serrer ou de réparer la garniture sans difficulté, et sa tige sort du cylindre en traversant une boîte à étoupes, comme nous l'avons expliqué chap. III, § V.

La vapeur arrive de la chaudière par le tube à vapeur, qui est fixé en *s* (*fig.* 92), et elle traverse d'abord une soupape régulatrice *r*, dont l'ouverture est réglée, selon le besoin de la machine, par la tringle à vis de rappel r' et la poignée à manivelle r''. La tringle r', en tirant sur un levier semblable au levier b_1 (*fig.* 91), mais caché derrière celui-ci, soulève plus ou moins la soupape régulatrice, qui est d'ailleurs conique et semblable à celles que nous avons décrites chap. III, § VIII.

Après avoir traversé la soupape régulatrice *r*, la vapeur pénètre dans une boîte à soupapes qui contient les soupapes d'admission et d'équilibre *a* et *b* (*fig.* 92). On en voit la disposition intérieure, en recourant à la *fig.* 79 *pl. XV*. Cette boîte est divisée en trois compartimens : celui du haut communique avec la soupape régulatrice ou le tube à vapeur; celui du milieu communique avec l'intérieur du cylindre; et enfin, celui du bas communique avec la colonne d'équilibre. Sur la cloison qui sépare le premier et le second de ces compartimens est fixée la soupape d'admission *a* et sur la cloison qui sépare le second et le troisième compartimens est placée la soupape d'équilibre; de sorte que, suivant celle de ces deux soupapes qui se trouve ouverte, le cylindre est mis en communication, soit avec la vapeur de la chaudière, soit avec la colonne d'équilibre. Cette disposition a déjà été expliquée avec plus de détails, en décrivant la machine de Cornwall à double action, chap. VIII, art. I.

Dans la *fig.* 92, les trois soupapes, régulatrice, d'admission et d'équilibre, sont vues à la suite l'une de l'autre en *r*, *a* et *b*. Dans la *fig.* 91, la soupape d'équilibre est seule représentée en *b*; lorsqu'elle est fermée, et la soupape d'admission ouverte, la vapeur passe de la chaudière dans le compartiment du milieu *d* de la boîte à soupapes, d'où elle pénètre dans le cylindre par le port supérieur D. Lorsqu'elle est ouverte, au contraire, et la soupape d'admission fermée, la vapeur sort du cylindre par le port D, descend dans la colonne d'équilibre B, et de là se répand sous le piston par le port inférieur D'. Au bas du cylindre à vapeur (*fig.* 91), on voit la soupape d'éduction qui est représentée en *e*. Lorsque cette soupape est ouverte, et la soupape d'équilibre *b* fermée, la vapeur alors située sous le piston s'échappe par le tube d'éduction H', et se rend au condenseur : ainsi le vide se fait sous le piston.

Les trois soupapes dont nous venons de parler sont à double siége ou à couronne, disposition qui a été décrite chap. III, § III. Elles sont ouvertes successivement par l'action de deux cataractes : l'une destinée à ouvrir les soupapes d'admission et d'éduction quand le piston doit fournir une course descendante; l'autre destinée à ouvrir la soupape d'équilibre quand le piston doit fournir une course montante. Elles sont, au contraire, fermées en temps convenable par le choc de tasseaux fixés à l'une des tiges de la machine, savoir : les soupapes d'admission et d'éduction pendant la course descendante, et la soupape d'équilibre pendant la course montante. C'est ce que nous allons expliquer avant d'aller plus loin.

Devant le cylindre à vapeur de la machine sont fixés deux montans verticaux N, N,

qui soutiennent trois axes horizontaux 1, 2, 3 (*fig.* 92). L'axe 1 gouverne la soupape d'admission *a*. Il porte trois petits leviers (*fig.* 91) : le premier conduit à la soupape d'admission, au moyen de la tringle a' et d'un levier semblable à b_1, mais caché derrière celui-ci, et il sert à ouvrir ou fermer cette soupape, selon le mouvement imprimé à l'axe ; le second, au moyen de la tringle a'', supporte un contre-poids A'', qui, en tombant, fait tourner l'axe et ouvre la soupape; le troisième est un levier à pattes A, qui, lorsqu'on le presse de haut en bas, relève le contre-poids et ferme, au contraire, la soupape. Enfin, l'axe 1 porte encore un petit secteur non marqué sur la figure, mais dont l'effet sera compris aisément. Lorsque la patte A fait tourner l'axe en relevant le contre-poids A'', ce petit secteur s'engage sous le cliquet α, qu'il soulève ; mais, dès que son angle supérieur a dépassé un arrêt fixé sous le cliquet, celui-ci retombe et le secteur se trouve arrêté. Il en résulte donc que l'axe ne peut retourner en arrière, et que la soupape reste nécessairement fermée jusqu'au décrochement du cliquet. Mais, si ensuite, on soulève quelque peu le cliquet, le petit secteur qui retient l'axe se trouve désengagé, le contre-poids tombe, et la soupape s'ouvre aussitôt. On voit un de ces secteurs représenté en α (*fig.* 78, *pl. XV*).

L'axe 2 sert à gouverner la soupape d'équilibre *b*. Il porte aussi trois leviers : celui du haut communique à la soupape par la tringle coudée b' et le levier b_1 ; le second, partiellement caché derrière la tige TT, supporte, enfilé dans un levier, un contre-poids B'', qui, en tombant, ouvre la soupape; le troisième est le levier à manche B, qui, lorsqu'on le presse de bas en haut, relève le contre-poids, ferme la soupape, et accroche un cliquet semblable à celui dont il a été question plus haut, mais non représenté sur la figure. On voit encore qu'en soulevant le cliquet, on fait tomber le contre-poids, et on ouvre la soupape, mais qu'on la ferme, au contraire, en relevant le levier à manche B.

Enfin, l'axe 3 gouverne la soupape d'éduction *e*. Il porte un levier qui communique à cette soupape par la tringle e' et le levier de renvoi e_1; un autre qui, au moyen de la tringle e'', supporte le contre-poids E'', dont la chute fait ouvrir la soupape; un troisième, ou levier à manche E, qui, en baissant, ferme la soupape ; et enfin, un secteur qui s'accroche sous le cliquet ε, et retient l'axe, malgré l'effort du contre-poids, quand la soupape est fermée. Outre les leviers dont il vient d'être question, l'axe 3 en porte encore un autre terminé par la tringle h', qui ne sert pas à manœuvrer les soupapes à vapeur, mais dont l'usage est d'ouvrir ou fermer en temps opportun la soupape d'injection du condenseur, comme nous le dirons en parlant de cette partie de l'appareil.

La disposition et l'effet des trois axes de l'encliquetage étant bien compris, le jeu de la machine le sera également. Le piston étant supposé arrêté au sommet du cylindre, si le machiniste veut faire travailler la machine, il soulève la tringle de la cataracte dont nous parlerons plus loin, et décroche ainsi les deux cliquets α et ε. Alors les contre-poids A'' et E'' tombent, les deux soupapes d'admission et d'éduction

s'ouvrent, et la vapeur de la chaudière pénètre au-dessus du piston ; tandis que celle qui occupait le dessous du piston s'écoule par la soupape d'éduction dans le tuyau H', qui la conduit au condenseur. Le piston, pressé en-dessus par la vapeur de la chaudière, et n'éprouvant en-dessous que la pression très-faible qui subsiste dans le condenseur, commence donc sa course descendante, et la tige TT, suspendue au grand balancier de la machine, descend en même temps. Quand le piston a parcouru une certaine portion de sa course, l'extrémité inférieure du tasseau double A'A' (*fig.* 91 et 92) rencontre le levier à pattes A, qui a été relevé, au moment de l'ouverture de la soupape d'admission, par la chute du contre-poids A'' ; il appuie sur ce levier, le fait baisser, et, par conséquent, relève le contre-poids A'', ferme la soupape, et, comme le tasseau a une longueur suffisante, il retient la patte baissée et la soupape fermée jusqu'à la fin de la course descendante ; c'est la position marquée sur la figure. Quand la course descendante est près de se terminer, le tasseau E', partiellement caché sur la *fig.* 91, rencontre le levier à manche E, qui, à l'origine de la course descendante, a été relevé par la chute du contre-poids E''; il le baisse et, par conséquent, relève le contre-poids, ferme la soupape d'éduction et accroche le cliquet : alors toutes les soupapes sont fermées à la fois, et le piston ayant épuisé sa vitesse acquise, s'arrête dans le cylindre.

Mais, en ce moment, la tringle de la cataracte d'équilibre soulève le cliquet de la soupape d'équilibre ; le contre-poids B'' de l'axe 2 tombe donc aussitôt, et la soupape s'ouvre. Alors la prépondérance de la maîtresse tige des pompes, ou du contrepoids de la machine, entraîne le piston, et celui-ci exécute sa course remontante ; dans le même instant, la chute de la maîtresse tige fesant descendre tous les plongeurs dans les pompes foulantes qui servent à l'épuisement, force l'eau de monter dans la conduite principale, et l'effet utile de la machine se produit. Quand le piston est près d'atteindre le sommet de sa course, le tasseau B' (*fig.* 91 et 92) rencontre le levier à manche B qui avait été baissé par la chute du contre-poids B'' au moment de l'ouverture de la soupape d'équilibre. Ce tasseau relève le levier, et, par conséquent, ferme la soupape et accroche son cliquet : alors le piston continue encore un peu sa course montante par l'effet de sa vitesse acquise, mais la vapeur enfermée au-dessus du piston se comprime graduellement et finit par le ramener au repos. La machine se trouve donc arrêtée de nouveau, et tout reste dans le même état, jusqu'à ce que la cataracte d'admission vienne ouvrir la soupape d'admission et celle d'éduction, ce qui produit une nouvelle course descendante, et ainsi de suite.

Nous avons dit qu'à l'origine de chaque course, c'est la tringle d'une cataracte qui vient ouvrir les soupapes convenables. Il reste donc maintenant à expliquer comment cet effet se produit, et, comme nous avons déjà, chap. III, § VIII, décrit en détail la disposition et l'effet des cataractes, il suffira d'une courte explication pour montrer ici leur usage. Il y a deux cataractes représentées en F et G (*fig.* 92). Celle de droite F, sert à ouvrir les deux soupapes d'admission et d'éduction pour pro-

duire la course descendante; et celle de gauche, G, sert à ouvrir la soupape d'équilibre pour produire la course montante. Chaque cataracte consiste en un vase de fonte contenant un petit corps de pompe muni d'un plongeur et de deux soupapes : l'une en-dessous, i, s'ouvrant en-dedans et laissant, par conséquent, le corps de pompe se remplir d'eau pendant la levée du plongeur; l'autre, i', s'ouvrant en-dehors et laissant ressortir l'eau pendant la descente du plongeur. En outre, le passage de sortie peut être réglé à une grandeur quelconque, au moyen de la tringle f' ou g', et de la tringle de rappel f'' ou g''.

Cela posé, l'opération des cataractes sera facile à comprendre. Pendant la descente du piston à vapeur et de la tige double TT (*fig.* 92), le taquet F', fixé à cette tige, appuie sur le long du levier de la cataracte F. Dans cette action, il enroule la chaîne i'' sur la poulie qu'on voit représentée sur la figure, et fait monter le contre-poids I; alors le plongeur de la cataracte remonte, et cette cataracte se charge d'eau. Ensuite, sitôt que la course remontante du piston à vapeur commence, le taquet F' se relève et abandonne le levier de la cataracte; ainsi, le contre-poids I retombe, mais lentement, parce que le rétrécissement du passage de sortie de l'eau ne lui permet pas un mouvement plus rapide. Pendant ce temps, le piston à vapeur est remonté au sommet du cylindre, et il y reste en repos, parce que la soupape d'admission ne s'ouvre pas encore; mais, après un certain temps, le contre-poids I étant redescendu d'une quantité suffisante, la tringle i''' de la cataracte se relève, et, dans cette action, elle vient heurter les deux cliquets α et ε qu'elle soulève. Les deux soupapes d'admission et d'éduction se trouvent donc ouvertes, et une nouvelle course descendante commence. Il faut seulement ajouter que la tringle i''' de la cataracte soulève, en remontant, le cliquet de la soupape d'éduction un moment avant de soulever celui de la soupape d'admission, et que cette tringle se termine au bas par une boucle, afin que le levier de la cataracte puisse remonter quelque temps sans agir sur la tringle, et, par conséquent, n'ouvre les deux soupapes que dans l'instant convenable.

La cataracte d'équilibre G est absolument semblable à celle d'admission; seulement, d'après la position de la chaîne sur la poulie, on voit qu'elle se charge d'eau, au moyen du taquet G', pendant la levée de la tringle TT, ou la course montante du piston à vapeur; et que pendant la course descendante elle redescend lentement jusqu'à ce qu'enfin, le piston à vapeur étant parvenu au bas de sa course, le contre-poids G'' arrive aussi au bas de la sienne, et la tringle de la cataracte, en remontant, décroche le cliquet de la soupape d'équilibre, ce qui produit une course montante.

La vapeur, en sortant du cylindre, est conduite, par le tuyau d'éduction H', au condenseur qui est représenté en H; c'est un vase hermétiquement fermé et plongé dans une bâche d'eau froide H''H''. Un tuyau dont on voit la section en h, y laisse pénétrer un jet d'eau froide qui condense la vapeur à mesure qu'elle arrive du cylindre; mais, pour que le condenseur ne soit pas exposé à se remplir d'eau pendant les intervalles de repos qui ont lieu entre les courses du piston, le tuyau d'injec-

tion est fermé, à son orifice extérieur, par une soupape qui communique par la tringle de renvoi h' à un petit levier fixé à l'axe 3 de l'encliquetage. Au moyen de cette disposition, quand la soupape d'éduction de la vapeur se ferme, la soupape d'injection du condenseur se ferme également; mais, sitôt que la soupape d'éduction se rouvre, et qu'il y a, par conséquent, de la vapeur à condenser, la soupape d'injection s'ouvre en même temps, et la condensation commence dans le condenseur. En outre, le tuyau d'injection porte encore un robinet qui permet de régler l'injection à la quantité convenable, ainsi que nous l'avons expliqué chap. III, § VI.

L'eau d'injection et de condensation amassée au fond du condenseur en est retirée par l'action de la pompe d'air qu'on voit représentée en L; c'est une pompe élévatoire à clapets. Pendant la montée du piston l de cette pompe, l'eau du condenseur en est aspirée en soulevant le clapet de pied h'', et elle passe dans le fond de la pompe; puis, pendant la descente du piston, elle traverse les clapets $l'l'$, et passe au-dessus du piston; et enfin, dans la course montante qui suit, cette eau est amenée au sommet du corps de pompe, d'où elle se répand dans le réservoir d'eau chaude en soulevant le clapet de décharge. Les différens clapets dont il vient d'être question s'ouvrent d'ailleurs dans le sens seulement de la sortie de l'eau; de sorte que celle-ci ne peut rentrer dans les vases d'où elle est une fois sortie : c'est ce que nous avons expliqué en décrivant ces appareils avec plus de détails, chap. III, § VI.

Le réservoir d'eau chaude est représenté en P, et l'eau qui y est amenée en est ensuite repuisée par la pompe d'eau chaude p, qui la fait passer dans la chaudière pour servir à son alimentation, et le surplus de l'eau chaude s'écoule par le déversoir de trop-plein P'. La pompe d'eau chaude est d'ailleurs une pompe foulante à plongeur, qui aspire l'eau du réservoir d'eau chaude par le tuyau p', pendant la montée du plongeur, et la refoule dans la chaudière par le tuyau p'', pendant la descente de ce plongeur. Il n'y a pas de pompe d'eau froide, parce que cette eau est fournie par le travail même de la machine, qui est une machine d'épuisement. Les tiges des pompes d'air et d'eau chaude sont mises en jeu par le grand balancier de la machine, et, pour les maintenir dans la direction verticale, elles sont munies chacune d'une queue qui glisse dans une douille l''', p'''.

La tige du piston à vapeur et la tige TT de l'encliquetage sont également suspendues au grand balancier de la machine, mais leur mouvement vertical est assuré par un parallélogramme dont nous avons déjà décrit, en détail, le principe et la disposition, chap. III, § V. On forme ce parallélogramme de quatre barres égales, deux par deux, et articulées à leurs extrémités $rr''s's''$. Ensuite, ayant mené par le point r et le centre O du grand balancier une ligne droite, et marqué le point s, où cette droite coupe la barre $s's''$, on attache l'angle s' du parallélogramme à un tenon fixe R, au moyen d'une bride Rs', dont la longueur est déterminée par la proportion Rs' : Os'' : : $s''s$: ss'; et, il résulte de cette disposition que le point r où est fixée la tige du piston se trouve, pendant les oscillations du grand balancier, maintenu

sans déviation sensible dans la direction verticale du cylindre à vapeur. En effet, à mesure que l'extrémité *s''* de la ligne *s''s'* est écartée à droite et à gauche de la verticale par les oscillations du grand balancier, l'extremité *s'* de la même ligne est écartée en sens contraire, par la résistance de la bride R*s'*, pendant ses oscillations autour du point fixe R ; et les écartemens des points *s''* et *s'* sont en raison inverse de la longueur des rayons d'oscillation O*s''* et R*s'*. Donc, d'abord, le point *s*, qui partage la ligne *s''s'* en raison inverse de ces rayons, ne subit aucune déviation sensible de la verticale. Mais puisque, d'après la manièredont le point *s* a été déterminé, la ligne O*s* passe toujours par le point *r*, quelle que soit la position du grand balancier, et qu'on a toujours la proportion O*s''* : O*r''* : : *s''s* : *r''r*, il s'ensuit que les points *r* et *s* décrivent des lignes semblables et semblablement placées. Donc, le point *r*, où est suspendue la tige du piston, se trouve maintenu dans la verticale aussi bien que le point *s*. Enfin, si l'on fait attention qu'au premier parallélogramme est joint un second *s''st''t'*, et que la tige TT de l'encliquetage est suspendue au point *t* déterminé par l'intersection de la droite O*s*, qui a déjà servi à déterminer le point *r*, on verra que le point *t* doit être maintenu dans la verticale, aussi bien que les points *r* et *s*.

Pour que le piston, en descendant dans le cylindre, ne soit pas exposé à en frapper le fond, ce qui arriverait, si l'on avait admis trop de vapeur sur le piston avant le commencement de la détente, l'extrémité *r''* du grand balancier est munie d'une traverse *k*, qui frappe sur des poutrelles élastiques destinées à recevoir et à amortir le choc. Cette disposition n'est pas adaptée à l'autre extrémité du balancier, parce qu'elle s'effectue dans le puits même où des moises transversales reçoivent et soutiennent le poids de la maîtresse tige ZZ à la fin de sa chute. Celle-ci, d'ailleurs, est toujours extrêmement lente, puisque la vitesse de cette course n'est ordinairement que le tiers de la course contraire.

Nous avons dit que l'action des pompes d'épuisement se produit pendant la course montante du piston à vapeur. Cet effet résulte de ce que les pompes d'épuisement sont des pompes foulantes, à l'exception de celle du fond du puits qui est une pompe élévatoire. Cette dernière est donc mise en jeu pendant la levée de la maîtresse tige, tandis que toutes les autres, qui constituent la charge principale de la machine, sont mises en jeu pendant la descente de leurs plongeurs, qui correspond à la course montante du piston à vapeur. Néanmoins, on construit maintenant des pompes foulantes, à double action, qui produisent l'épuisement dans la course montante aussi bien que dans la course descendante. Elles ont l'avantage de permettre des conduites d'un moindre diamètre, ce qui est important lorsque l'épuisement doit être très-considérable. On en voit une représentée *pl.* X, *fig.* 69. On reconnait au premier coup d'œil que, pendant la descente du plongeur, les soupapes *a* et *b'* s'ouvrent, tandis que les soupapes *b* et *a'* se ferment. Ainsi, l'eau monte du tuyau aspirateur A dans le corps de pompe, au-

dessus du piston, tandis que l'eau contenue au-dessous est refoulée par le tuyau B' dans le tube principal M; puis, pendant la levée du plongeur, les soupapes a' et b s'ouvrent, tandis que les deux autres se ferment, et, par conséquent, l'eau contenue au-dessus du piston passe dans le tube M, tandis que celle du puits arrive sous le piston, dans le corps de pompe, par le tuyau aspirateur B. Les soupapes représentées sur la figure sont dues à MM. Harvey et West; elles sont à double siége, comme celles décrites chap. III, § III; mais, comme les deux siéges sont de grandeur inégale, et que la pression, pour ouvrir ou fermer la soupape, ne s'exerce que sur leur différence, on peut limiter cette action au degré que l'on veut. Il en résulte que ces soupapes ont l'avantage de se fermer sans choc; et, de plus, elles ouvrent ou ferment instantanément le passage à l'eau, ce qui empêche celle-ci de ressortir partiellement de la pompe au moment de la clôture de la soupape.

ARTICLE II.

THÉORIE DE LA MACHINE DE CORNWALL A SIMPLE ACTION.

§ I. *Du règlement de la machine.*

Nous avons dit, en décrivant la machine, que, dans la course descendante du piston à vapeur, on a soin de n'admettre dans le cylindre que la quantité de vapeur nécessaire pour pousser le piston, avec l'aide de la détente, jusqu'au point où doit se terminer sa course, sans lui laisser dépasser ce point. Ce règlement s'obtient facilement par tâtonnement. Ayant d'abord fixé le tasseau de clôture de la soupape d'admission au point où l'on veut intercepter la vapeur de la chaudière pour faire commencer la détente, on ouvre avec précaution la soupape régulatrice, qui règle la grandeur du passage laissé à la vapeur pour arriver dans le cylindre; alors la machine se met en mouvement, et la course descendante s'exécute. Si l'on trouve que, dans cette course, le piston n'atteint pas le point fixé pour l'extrémité de son oscillation, on ouvre un peu plus la soupape régulatrice, et l'on continue de l'ouvrir jusqu'à ce que le piston accomplisse sa course entière. Si l'on trouve, au contraire, que le piston dépasse ce point, c'est une preuve que l'ouverture de la soupape régulatrice est trop grande, et on la réduit, en conséquence, jusqu'à ce que la garde du balancier vienne toucher sans choc les poutrelles élastiques qui limitent ses oscillations. Il est évident qu'on obtient également l'effet désiré en déplaçant le tasseau de clôture de la soupape d'admission, ce qui diminue le temps d'admission de la vapeur dans le cylindre.

Dans la course montante, au contraire, on ferme un peu plus tôt ou un peu plus tard la soupape d'équilibre, jusqu'à ce qu'on voie que le piston parvient juste

au bout de sa course sans la dépasser. Par ce moyen, la vapeur interceptée au-dessus du piston se comprime de plus en plus et finit par arrêter le piston ; mais on remarquera que, dans cette action, il n'y a pas de force perdue, parce que la vapeur, ainsi comprimée, en se joignant à la vapeur fournie par la chaudière, contribue elle-même à produire la nouvelle course descendante du piston. On obtient encore le résultat désiré en diminuant le contre-poids de la machine, c'est-à-dire en équilibrant, au moyen des contre-balanciers en usage, une plus grande portion du poids de la maîtresse tige des pompes, ce qui diminue d'autant sa tendance à retomber ; et comme, à mesure que les plongeurs descendent dans les pompes, leur poids est diminué de celui de toute l'eau qu'ils déplacent, et, qu'ainsi, la prépondérance de la maîtresse tige devient de plus en plus petite, on voit qu'à la fin de cette course, qui d'ailleurs est toujours extrêmement lente, le mouvement s'arrête facilement et sans choc, lorsque les patins de la maîtresse tige viennent reposer sur les moises transversales qui limitent sa descente dans le puits. On augmente souvent encore cet effet d'allégement de la maîtresse tige en employant, pour la contre-balancer, une colonne d'eau contenue dans un tuyau en siphon, et sur laquelle agit un plongeur. Celui-ci, en descendant dans une des branches du siphon, fait remonter la colonne d'eau dans l'autre, et la différence de niveau produit une résistance qui augmente à mesure de la descente de la maîtresse tige.

On voit que, dans les deux courses, le mouvement du piston se trouve arrêté sans choc important ou sans perte de force vive. Par conséquent, en recourant à ce que nous avons dit, chap. XI, art. II, § I, relativement aux machines de Watt à simple action dont le règlement est analogue, on reconnaîtra que, dans les machines dont nous nous occupons, les relations entre les diverses forces qui agissent sur le piston peuvent toujours être établies d'après les mêmes principes, c'est-à-dire d'après la condition, 1°. que les quantités de travail exécutées par la puissance et par la résistance soient égales entre elles dans chacune de ces deux courses ; et 2°. que la quantité d'eau correspondante à la vapeur dépensée dans le cylindre soit égale à la quantité d'eau effectivement vaporisée dans la chaudière. C'est donc encore d'après le développement de ces deux propositions, que nous allons établir les équations propres à déterminer, soit les effets, soit les proportions de ces machines.

§ II. *Des effets de la machine dans les différens cas qui peuvent se présenter, et des conditions qui lui font produire son maximum d'effet utile.*

L'analogie déjà mentionnée de ces machines avec celles de Watt à simple action nous dispense de développer ici les quatre cas qui peuvent se présenter dans leur travail. On reconnaîtra facilement que ces cas sont les suivans : celui où la machine travaille avec une charge ou une vitesse quelconques, la clôture de la soupape d'équilibre, ainsi que la détente ou le contre-poids étant d'ailleurs fixés arbitrairement à priori ; celui où elle travaille avec la charge ou la vitesse qui produisent le

maximum d'effet utile pour la clôture de la soupape d'équilibre et la détente ou le contre-poids fixés; celui où la clôture de la soupape d'équilibre est celle qui produit le plus d'effet utile pour la détente ou le contre-poids donnés; et enfin, celui où la détente ou le contre-poids sont eux-mêmes déterminés pour l'action la plus avantageuse de la machine, ce qui lui fait produire, par conséquent, le maximum *absolu* d'effet utile dont elle est capable.

D'après ce que nous avons vu, les relations propres à résoudre les problèmes qui se présentent relativement à ces machines, s'établiront encore en exprimant que les quantités de travail développées par la puissance et par la résistance dans les deux courses du piston sont égales entre elles, et, en outre, en exprimant que la production de vapeur est égale à sa dépense.

Or, pour commencer par la course descendante du piston, et en adoptant les mêmes notations que dans les machines de Watt à simple action, c'est-à-dire en appelant P' la pression moyenne inconnue de la vapeur pendant son admission dans le cylindre, a l'aire du cylindre, l la course du piston, l' la course d'admission ou portion de la course totale parcourue pendant l'admission de la vapeur dans le cylindre, c la liberté du cylindre, ou la valeur moyenne, au sommet et au bas du cylindre, de l'espace vide que ne parcourt pas le piston, mais qui se remplit de vapeur à chaque course; enfin, m et n étant les constantes du volume spécifique de la vapeur, et k' une fonction des quantités l et l' dont la valeur est

$$k' = \frac{l'}{l'+c} + \log \frac{l+c}{l'+c},$$

le travail produit par la puissance, c'est-à-dire par l'admission et la détente de la vapeur dans le cylindre, a pour expression

$$k'a(l'+c)(n+P') - nal.$$

D'autre part, la résistance dans cette course se compose du contre-poids Π, de la pression p subsistant sous le piston après condensation imparfaite de la vapeur, de la charge ρ' de la pompe élévatoire qui sert à enlever l'eau du fond du puits, pour la verser dans le réservoir de la pompe foulante et que nous supposons rapportée à la surface et à la vitesse du piston, du frottement f' de la machine dans cette course, et, enfin, du surplus $\delta(\rho'+\Pi)$ qu'éprouve ce frottement en vertu du contrepoids et de la charge ρ' de la pompe élévatoire, ou de toute autre pompe servant à l'effet *utile*, qui pourrait être mise en jeu dans cette course et serait alors comprise dans la désignation de la quantité ρ'.

D'après ces notations, on a donc l'équation

$$k'a(l'+c)(n+P') - nal = [(1+\delta)(\rho'+\Pi)+p+f']\,al,$$

qui donne

$$n + P' = \frac{l}{l' + c} \cdot \frac{1}{k'} [(1 + \delta)(\rho' + \Pi) + n + p + f'].\qquad (A)$$

Nous comprenons ici, dans le frottement f', non-seulement la force nécessaire pour mouvoir les joints et pièces frottantes du mécanisme en général, mais encore la force nécessaire pour le travail des pompes de service sans lesquelles la machine ne pourrait agir, comme la pompe d'eau chaude, ou toute autre pompe d'un usage semblable qui serait mise en action dans cette course. Ces diverses pompes ne servant qu'à mettre la machine en état d'exécuter son travail, et n'étant pas employées autrement à la production de l'effet *utile*, doivent effectivement être considérées comme faisant partie de la résistance passive de la machine; et, du reste, on les exprimerait par des signes séparés, que le calcul ne changerait pas pour cela.

L'équation que nous venons d'obtenir exprime donc la condition du travail de la course descendante. Dans la course montante, au contraire, la puissance est le contre-poids de la machine, et la résistance se compose de la charge de la pompe foulante que nous exprimerons par ρ'', en la rapportant à la surface et à la vitesse du piston, c'est-à-dire en tenant compte de sa distance à l'axe du grand balancier, de la pression de la vapeur comprimée au-dessus du piston après la clôture de la soupape d'équilibre, et, enfin, du frottement f'' de la machine non chargée, frottement dans lequel nous comprenons les pompes de service que l'on fait fonctionner dans cette course, comme la pompe d'air et la pompe d'eau froide, et le travail équivalant au choc de la maîtresse tige, s'il a lieu. Nous ne comptons aucun frottement additionnel de la machine pour la charge ρ'', parce que la pompe est mise directement en jeu par la chute du contre-poids sans l'intermédiaire de la machine. Quant au travail dû à la compression de la vapeur, au-dessus du piston, en recourant à la recherche semblable pour les machines de Watt à simple action, on reconnaîtra qu'il a pour expression

$$k'' al (n + P') \frac{l' + c}{l},$$

dans laquelle k'' représente l'expression

$$k'' = \frac{l - l'' + c}{l + 2c} \log \frac{l - l'' + c}{c} - \frac{l'' + c}{l + 2c} \log \frac{l + c}{l'' + c}.$$

Donc, la condition d'égalité du travail entre la puissance et la résistance, dans cette course, produit l'équation

$$k'' al (n + P') \frac{l' + c}{l} + \rho'' al + f'' al = \Pi al,$$

qui donne

$$n + P' = \frac{l}{l' + c} \cdot \frac{1}{k''} (\Pi - p'' - f''). \qquad \textbf{(B)}$$

On remarquera que, dans quelques machines de ce système, la compression de la vapeur, qui contribue à arrêter le piston à la fin de la course montante, ne se produit pas uniquement après la clôture de la soupape d'équilibre, mais elle a lieu graduellement pendant une certaine portion de la course du piston, et résulte de ce que la soupape d'équilibre ne laisse pas circuler assez facilement la vapeur d'une partie à l'autre du cylindre. Cet état de la machine correspond évidemment à l'emploi d'une soupape d'équilibre plus large, mais qui serait partiellement fermée pendant la course; et, ainsi, elle revient à effectuer la compression de la vapeur, non pas en fermant d'un seul coup la soupape d'équilibre dans les derniers instans de la course, mais en la fermant partiellement et graduellement pendant un plus long intervalle. Dans ce cas, la compression finale de la vapeur dans un même espace, qui est la liberté du cylindre, et, par conséquent, aussi son action pour arrêter le piston, est toujours la même; et la vapeur ainsi refoulée au sommet du cylindre contribue toujours à exécuter la prochaine course descendante, comme dans le cas où il y a clôture subite de la soupape d'équilibre. Ainsi, le mode d'opération de la machine est le même que dans le cas que nous avons considéré dans les équations; seulement, il ne faut pas alors prendre pour l'' le point même de la clôture *finale* de la soupape d'équilibre, mais il faut tenir compte de ce que, depuis quelque temps déjà, cette soupape était partiellement fermée. Si l'on connaît la pression qu'avait la vapeur à l'origine de la course montante, et sa compression définitive dans la liberté du cylindre, à la fin de la même course, on pourra évaluer la quantité l'' en cherchant à quel point de la course du piston il aurait fallu clore tout à coup la soupape d'équilibre pour produire la même compression finale. Ainsi, par exemple, si, à l'origine de la course montante, la pression dans le cylindre était ω', et qu'elle fût ω'' à la fin de la même course, on voit qu'en admettant approximativement, dans ce court intervalle, que le volume de la vapeur varie en raison inverse de sa pression, on aurait

$$\frac{a(l - l'' + c)}{ac} = \frac{\omega''}{\omega'},$$

qui donne

$$l - l'' + c = c\,\frac{\omega''}{\omega'}.$$

Dans ce cas donc, on pourra toujours faire usage des formules, en y mettant pour l'' sa valeur ainsi déterminée.

Il peut arriver aussi, dans quelques machines, que l'on ne fasse aucun usage de la compression de la vapeur pour arrêter le piston; celui-ci se trouvant alors ramené au repos, soit par l'effet du contre-poids *d'eau* qu'on a expliqué, et dont la résistance est plus considérable à la fin de la course qu'à son origine, soit par un léger choc de la maîtresse tige dans le puits. Dans ces différens cas, il suffira de faire dans les équations $l'' = l$, ce qui rendra $k'' = 0$, et elles donneront toujours la solution cherchée, puisque cette substitution y rendra nul le terme qui représentait la compression de la vapeur.

Enfin, en appelant v la vitesse du piston mesurée d'après le nombre des courses *utiles* par minute, et S la vaporisation *effective* de la chaudière, la condition de l'égalité entre la dépense et la production de vapeur produit, comme auparavant, chap. XI, art. II, § III, l'équation

$$n + P' = m\frac{l+2c}{l''+c}\cdot\frac{l}{l'+c}\cdot\frac{S}{av}. \qquad (C)$$

C'est la troisième relation cherchée.

Par conséquent, en procédant, comme dans le chapitre précédent, c'est-à-dire éliminant d'abord P' entre les équations (A) et (C), puis entre les équations (B) et (C), on aura les deux équations préliminaires

$$\frac{1}{k'}[n+p+f'+(1+\delta)\rho'+(1+\delta)\Pi] = m\frac{l+2c}{l''+c}\cdot\frac{S}{av},$$

$$\frac{1}{k''}(\Pi-\rho''-f'') = m\frac{l+2c}{l''+c}\cdot\frac{S}{av}.$$

Enfin, en éliminant Π entre ces deux équations, et faisant

$$\rho'+\rho''=r,$$

parce que la charge totale, ou la quantité totale d'eau élevée par la machine, est égale à $(\rho'+\rho'')$, ou à la somme des quantités d'eau élevées, soit dans une course, soit dans l'autre, on arrive aux équations suivantes :

$$v = m\frac{S}{a}\cdot\frac{l+2c}{l''+c}\cdot\frac{k'-(1+\delta)k''}{(1+\delta)r+n+p+f'+(1+\delta)f''}, \qquad (1)$$

$$ar = m\frac{S}{v}\cdot\frac{l+2c}{l''+c}\left(\frac{k'}{1+\delta}-k''\right)-\frac{a}{1+\delta}[n+p+f'+(1+\delta)f''], \qquad (2)$$

$$S = \frac{av}{m}\cdot\frac{l''+c}{l+2c}\cdot\frac{(1+\delta)r+n+p+f'+(1+\delta)f''}{k'-(1+\delta)k''}. \qquad (3)$$

$$\text{E. u.} = arv. \qquad (4)$$

Ces formules donneront la solution de tous les problèmes que présentent ces machines. Pour simplifier le calcul, en ce qui regarde les quantités k' et k'', on en trouvera les valeurs inscrites dans la Table que nous avons présentée relativement aux machines de Watt à simple action ; mais, on pourra suppléer à cette Table en se souvenant qu'on a

$$k' = \frac{l'}{l' + c} + \log \frac{l + c}{l' + c},$$

$$k'' = \frac{l - l'' + c}{l + 2c} \log \frac{l - l'' + c}{c} - \frac{l'' + c}{l + 2c} \log \frac{l + c}{l'' + c};$$

et que les logarithmes indiqués dans ces formules sont des logarithmes hyperboliques dont la valeur est égale aux logarithmes ordinaires des Tables, multipliés par le nombre 2.302585, ou approximativement par le nombre 2.303.

Pour résoudre, au moyen des formules précédentes, les diverses questions qui peuvent se présenter, il faut encore observer que, comme la quantité l'' contenue dans ces formules n'est pas ordinairement connue à priori, mais qu'elle résulte seulement du contre-poids Π, qui est la véritable donnée du problème, il convient de pouvoir la déterminer en fonction de Π. Pour cela, il suffit d'éliminer P' entre les deux équations générales (A) et (B), ou (A) et (C), et l'on obtient

$$k'' = \frac{\Pi - (r - \rho') - f''}{(1 + \delta)(\Pi + \rho') + n + p + f''}, \qquad \text{(E)}$$

$$\frac{l'' + c}{l + 2c} = m \frac{S}{av} \frac{k'}{(1 + \delta)(\Pi + \rho') + n + p + f'}. \qquad \text{(E')}$$

Ces équations, que l'on résoudra, du reste, comme il a été expliqué pour les machines de Watt à simple action, chap. XI, art. II, § III, donneront $\frac{l''}{l}$ dès que le contre-poids et la charge ou la vitesse de la machine seront connus. Dans le cas du maximum d'effet utile dont nous parlerons dans un instant, on ne connait à priori ni la charge ni la vitesse de la machine ; mais alors, la quantité $\frac{l''}{l}$ sera déterminée directement. Les équations (E), (E'), employées selon le cas considéré, feront donc toujours connaitre $\frac{l''}{l}$ dès que le contre-poids Π sera donné ; et, par conséquent, dès ce moment, cette quantité pourra être considérée comme l'une des données du problème.

Enfin, sans entrer dans d'autres détails à cet égard, on reconnait immédiatement, par l'analogie des formules que nous venons d'obtenir avec celles que nous

avons présentées relativement aux machines de Watt à simple action, qu'on peut leur appliquer les conclusions suivantes :

1°. La charge ou la vitesse qui, pour une clôture donnée de la soupape d'équilibre et une détente ou un contre-poids fixés, produisent le maximum d'effet utile, sont données par les formules

$$v' = m\,\frac{l+2c}{l''+c}\cdot\frac{l}{l'+c}\cdot\frac{S}{a}\cdot\frac{1}{n+P}, \qquad (5)$$

$$ar' = a\,\frac{l'+c}{l}\left(\frac{k'}{1+\delta}-k''\right)(n+P)-\frac{a}{1+\delta}\left[n+p+f'+(1+\delta)f''\right]. \qquad (6)$$

Et ces équations serviront encore à déterminer le frottement de la machine par les procédés indiqués relativement aux machines de Watt à simple action.

2°. La clôture de la soupape d'équilibre, qui produit le plus grand effet utile, avec une détente fixée, est donnée par la condition

$$\log\frac{l-l''+c}{c}=\frac{k'}{1+\delta}-\frac{1}{1+\delta}\cdot\frac{l}{l'+c}\cdot\frac{n+p+f'+(1+\delta)f''}{n+P}. \qquad (7)$$

3°. La détente qui produit le maximum absolu d'effet utile sera donnée approximativement par la formule

$$\frac{l'}{l}=\frac{n+p+f'+(1+\delta)f''}{n+P}, \qquad (9)$$

et le contre-poids correspondant à cette détente, pour le plus grand effet de la machine, sera connu par l'équation (A), en y introduisant la condition $P'=P$, savoir,

$$\Pi=\frac{\frac{l'+c}{l}k'(n+P)-(n+p+f')}{1+\delta}-\rho'. \qquad (8)$$

On remarquera que cette valeur du contre-poids est déterminée en fonction de la détente $\frac{l'}{l}$, au lieu de l'être par la clôture de la soupape d'équilibre $\frac{l''}{l}$, comme dans les machines de Watt à simple effet. Cela tient à ce que, dans les machines de Cornwall, c'est la course du piston produite par la vapeur qui s'effectue sans agir sur la charge variable de la machine ; de sorte que, dans le cas du maximum d'effet utile, ou de $P'=P$, l'équation (A) ne contient d'indéterminée que Π et $\frac{l'}{l}$, tandis que, dans les machines de Watt à simple action, c'est la course remontante du piston qui s'exécute sans charge, ce qui fait que c'est alors l'équation (B) qui, ne contenant que Π et $\frac{l''}{l}$, sert à déterminer l'une de ces quantités en fonction de l'autre.

Du reste, nous verrons la même circonstance se produire dans les machines atmosphériques, parce qu'elles sont, à cet égard, dans un cas analogue à celui des machines de Cornwall.

Nous devons ajouter que si le contre-poids, la vitesse ou la détente de la machine, déterminés par les formules précédentes, offrent des inconvéniens dans la pratique, on se bornera à admettre les valeurs qui s'éloigneront le moins possible de celles du calcul. Nous renvoyons, à cet égard, ainsi que pour tout ce que les recherches précédentes pourraient laisser d'incomplet, aux développemens déjà donnés en traitant des machines de Watt à simple action.

Enfin, il reste encore un point sur lequel nous devons ajouter quelques éclaircissemens. Dans la théorie que nous venons d'exposer, on a pu remarquer qu'il n'est pas question de la *cataracte*. Comme, cependant, cet appareil est d'un usage général dans les machines de Cornwall, il est nécessaire que nous fassions connaitre en peu de mots comment son effet se fait sentir dans les formules sans y figurer d'une manière directe. Nous avons déjà montré, chap. III, § VIII, que l'effet immédiat de la cataracte, comme de tout autre appareil qui diminue la dépense de vapeur par le cylindre, est de réduire d'une manière correspondante la production de vapeur dans la chaudière; et la raison en est que le machiniste ne poussera jamais son feu de manière à produire plus de vapeur qu'il ne s'en dépense, attendu que le reste se perdrait inutilement par les soupapes de sûreté, et que certainement il ne laisserait pas un tel état de choses continuer. L'effet de la cataracte est donc de limiter la vaporisation de la chaudière à un certain taux; mais une fois cette vaporisation produite, elle agira toujours dans le cylindre de la même manière, c'est-à-dire dans les conditions exprimées par les équations générales que nous avons exposées. Donc, si l'on observe la vaporisation effectuée dans la chaudière avec ou sans cataracte, et qu'on la substitue dans les formules obtenues, celles-ci feront toujours connaître les effets produits, et c'est ce que prouveront d'ailleurs les expériences que nous rapporterons un peu plus loin sur la machine d'Old-ford, à Londres, puisque ces expériences ont été faites avec l'usage de la cataracte.

ARTICLE. III.

FORMULES PRATIQUES POUR LE CALCUL DES MACHINES DE CORNWALL A SIMPLE ACTION, ET EXEMPLE DE LEUR APPLICATION.

§ I. *Formules pratiques et exemple de leur application.*

Pour avoir les formules numériques propres au calcul des machines de Cornwall à simple action, il faut connaitre la valeur des constantes qui figurent dans les équations.

Ces machines étant à condensation, les constantes du volume spécifique de la vapeur ont d'abord les valeurs suivantes, quand on emploie les mesures anglaises :

$$m = 4{,}100{,}000,$$
$$n = 250.$$

La pression de la vapeur dans la chaudière varie de 40 à 50 et à 80 livres par pouce carré; et, ainsi, la valeur de la quantité P doit être prise, par mesure directe, pour chaque machine que l'on veut soumettre au calcul.

Quant à la pression de condensation p, elle doit être observée chaque fois, au moyen de l'indicateur de Watt. Mais, pour s'en faire une idée générale, on doit observer que, comme ces machines sont très-perfectionnées, et qu'elles sont toujours abondamment pourvues d'eau d'injection, puisqu'elles servent aux épuisemens, on peut, sans difficulté, y exécuter la condensation d'une manière beaucoup plus complète que dans la plupart des autres machines à vapeur. En outre, comme les passages du cylindre au condenseur sont d'un diamètre très-considérable et que, d'après la construction des soupapes, ces passages s'ouvrent instantanément à leur grandeur totale, il ne peut exister non plus qu'une très-faible différence entre la pression du condenseur et celle qui subsiste dans le cylindre à vapeur sous le piston. Lorsqu'on n'a pas mesuré directement la pression p, on peut admettre généralement que sa valeur se réduit à 0.75 livre par pouce carré seulement. On a donc alors, dans une machine en très-bon état, et en rapportant cette pression au pied carré,

$$p = 0.75 \times 144 \text{ lbs.}$$

Sous le rapport du frottement, ces machines offrent des avantages analogues. Comme les effets des machines en opération dans les mines de Cornwall sont enregistrés par une commission d'ingénieurs spécialement chargés de ce soin, et que le tableau des effets produits par chacune d'elles est publié mensuellement, il en est résulté, entre les constructeurs des machines, une rivalité qui les a conduits à des combinaisons ingénieuses et à une perfection de travail inconnue auparavant; c'est ainsi que, non-seulement, on est parvenu à obtenir un degré de condensation très-complet dans le cylindre, mais aussi à réduire le frottement beaucoup au-dessous de celui des machines de Watt. D'après les expériences de M. Wicksteed, dont nous parlerons un peu plus loin, on trouve que le frottement sans charge, dans une machine de ce système bien exécutée et d'un cylindre de 80 pouces, ou 6.66 pieds de diamètre, se réduit à 0.186 livre par pouce carré de la surface du piston dans la course montante, et à 0.339 livre par pouce carré dans la course descendante, qui met en action la pompe d'air et la pompe d'eau froide; et il faut remarquer que, dans la machine soumise à l'observation, cette évaluation comprenait, en outre, le frottement de l'eau dans les tuyaux d'ascension et des plongeurs dans

la pompe d'épuisement. Si l'on pouvait séparer ces derniers frottemens, on trouverait que celui de la machine est moindre qu'il ne vient d'être indiqué; mais, comme nous manquons de données suffisantes à cet égard, nous laisserons cette évaluation dans son état complexe, en notant seulement qu'elle exprime la somme des frottemens de la machine et des pompes d'épuisement. Ainsi, avec cette restriction, on a, pour ce cas particulier,

$$f' = 0.339 \times 144 \text{ lbs, et } f'' = 0.186 \times 144 \text{ lbs.}$$

Mais, comme l'expérience a démontré, dans les machines de Watt, que le frottement varie en raison inverse du diamètre du cylindre, on peut appliquer l'évaluation précédente à des machines de dimensions différentes, en la multipliant par le rapport du nombre 6.66 à celui qui exprime, en pieds, le diamètre du cylindre de la machine dont on veut connaitre le frottement. En représentant par d le diamètre du cylindre de la machine exprimé en pieds, et par f' et f'' le frottement, dans les deux courses, exprimé en livres par pied carré de la surface du piston, y compris toutefois celui des pompes d'épuisement, on peut donc prendre en général

$$f' = \frac{325}{d},\ f'' = \frac{180}{d}.$$

Relativement à la quantité δ, ou au frottement additionnel dû à la charge, nous ferons observer que sa valeur doit nécessairement subir des variations analogues à celles du frottement sans charge, puisque tous deux dépendent également du degré de perfection avec lequel est composée et construite la machine. Jusqu'ici, nous avons trouvé que le frottement des machines à vapeur de divers genres, travaillant sans charge, peut être évalué approximativement par la formule $f = \frac{300}{d}$, qui convient également aux machines à haute pression, aux locomotives et aux machines de Watt; et, dans le même cas, nous avons eu, pour le frottement additionnel par unité de la charge sur le piston, $\delta = 0.14$. Mais, pour les machines de Cornwall à simple action, nous voyons que le frottement moyen des deux courses n'est représenté que par la fraction $\frac{250}{d}$; et, en en retranchant approximativement les $\frac{2}{5}$ pour le frottement des pompes d'épuisement, il ne resterait, pour celui de la machine elle-même, que la quantité $\frac{150}{d}$, qui est moitié du frottement des machines de Watt. Nous ne pouvons donc évaluer non plus le frottement additionnel, dans les machines de Cornwall à simple action, qu'à moitié de sa valeur dans les machines de Watt. Par conséquent, jusqu'à déterminaison spéciale, nous ferons, dans ces machines,

$$\delta = 0.07.$$

Enfin, relativement à la vaporisation *effective*, les machines de Cornwall à simple action présentent encore des différences avec celles que nous avons traitées jusqu'ici. Comme, dans ces machines, les passages de la vapeur s'ouvrent très rapidement, et que l'espace réservé à la vapeur dans la chaudière est peu considérable à cause de la position intérieure du foyer, il n'y a pas de doute qu'une portion notable de l'eau de la chaudière ne soit d'abord entraînée à l'état liquide et enlevée avec la vapeur; mais, une fois parvenue dans le cylindre, cette eau s'y trouve placée dans une condition particulière. En effet, comme pendant la course du piston, la détente de la vapeur est très-considérable, et que nous avons vu que, lorsque la vapeur diminue de pression dans les machines, sa température baisse en même temps d'une manière analogue, il est clair qu'à mesure que le piston avance dans sa course après la clôture de la soupape d'admission, la température de la vapeur dans le cylindre baisse rapidement, et que, vers la fin de la course surtout, elle devient excessivement basse. Mais, dans les machines de Cornwall, la surface extérieure du cylindre se trouve maintenue à une haute température, soit au moyen de la circulation de la vapeur de la chaudière entre l'enveloppe du cylindre à vapeur et ce cylindre lui-même, soit quelquefois au moyen d'un feu particulier allumé sous le cylindre. Dans ces conditions, il est clair qu'à mesure que la vapeur se détend dans le cylindre, et que sa température baisse, cette vapeur se trouve en contact avec un métal dont la température diffère de plus en plus de la sienne, et que, par conséquent, elle doit en recevoir des additions toujours croissantes de calorique. La quantité de chaleur qui lui est ainsi communiquée doit évidemment dépendre de la température entretenue dans l'enveloppe du cylindre, du degré de détente auquel on fait travailler la machine, et de la lenteur du mouvement du piston; et ces circonstances constituent un avantage nouveau en faveur des machines à haute pression, à forte détente et à mouvement lent. Actuellement, on doit observer que le premier effet de cette addition successive de calorique doit être de vaporiser l'eau tenue en suspension dans ce cylindre. Ainsi, l'eau entraînée à l'état liquide doit, dans ces machines, passer à l'état de vapeur et concourir à la production des effets utiles.

Cela posé, il peut arriver, selon les cas, que l'eau enlevée à l'état liquide soit vaporisée en partie, ou qu'elle le soit en totalité, ou, enfin, que non-seulement elle soit vaporisée en totalité, mais encore qu'après sa transformation en fluide élastique la vapeur totale contenue dans le cylindre reçoive encore de l'enveloppe de nouvelles additions de calorique tendant à accroître les effets utiles de la machine. Il est évident que ces trois cas peuvent se présenter dans les machines, et le troisième peut être la cause du travail particulièrement avantageux de quelques machines de ce système; mais le cas le plus habituel paraît être celui où le réchauffement du cylindre va jusqu'à vaporiser toute l'eau entraînée à l'état liquide, sans néanmoins augmenter notablement la température de la vapeur dilatée. En effet, en examinant les tracés d'indicateur, et tenant compte du volume d'eau vaporisé par coup

de piston dans la chaudière ; puis, notant le volume que la vapeur résultante occupe dans le cylindre au moment de la clôture du régulateur, et enfin, observant la pression marquée par l'indicateur au même instant, on trouve, d'abord, que le volume de la vapeur dans le cylindre est moindre que celui qui devrait correspondre à la transformation *totale* de l'eau en vapeur, à la température marquée. Donc, dans ce premier moment, toute l'eau enlevée de la chaudière n'est pas transformée en vapeur : une portion se trouve encore à l'état liquide et mélangée avec la vapeur. Mais ensuite, si l'on compare successivement les divers volumes occupés par la vapeur dans le cylindre, à mesure de sa détente, avec ceux qui correspondent à la vaporisation totale de l'eau, aux températures respectives marquées au même instant par l'indicateur, on trouve que ces volumes se rapprochent de plus en plus l'un de l'autre, et qu'à la fin de la course du piston, ils ne diffèrent, en général, que très-peu. On peut donc conclure de ces observations, que nous livrons d'ailleurs à l'attention des praticiens, que, dans les machines de Cornwall à simple action, l'eau tenue en suspension, dans la vapeur, se transforme elle-même en vapeur pendant la durée de la course du piston, et se trouve ainsi utilisée dans le cylindre; mais que cet effet, dû au réchauffement du cylindre, ne va pas, en général, jusqu'à augmenter notablement l'élasticité de la vapeur après l'avoir formée.

Nous tiendrons donc compte de cette circonstance en faisant, dans ces machines, $S = \mathcal{S}$, c'est-à-dire en exprimant que la vaporisation effective est égale à la vaporisation brute. De plus, on voit que si, dans un cas particulier, on pouvait supposer que la vapeur, après sa formation, subit encore le plus grand réchauffement possible, c'est-à-dire qu'elle soit ramenée dans le cylindre à la même température que la chaudière, il suffirait, pour en tenir compte, de faire, dans les formules, la quantité $n = 0$; car nous avons vu, chap. II, art. I, § VI, que cette condition correspond à la supposition que la vapeur, tout en variant de volume dans la machine, conserve cependant sa température, ou suit la loi de Mariotte; mais, comme nous l'avons dit plus haut, ce cas ne se présente pas dans l'état ordinaire de ces machines.

Ces données diverses devront être introduites dans les équations lorsqu'on voudra terminer le calcul pour chaque machine respective; mais, en y substituant d'abord pour m et n leurs valeurs qui conviennent à tous les cas indistinctement, on obtient les formules numériques suivantes.

Formules pratiques pour les machines de Cornwall à simple action (mesures anglaises).

CAS D'UNE CHARGE OU D'UNE VITESSE QUELCONQUES, AVEC UNE CLÔTURE DE LA SOUPAPE D'ÉQUILIBRE ET UNE DÉTENTE OU UN CONTRE-POIDS QUELCONQUES.

$$v = 4{,}100{,}000 \frac{S}{a} \cdot \frac{l + 2c}{l'' + c} \cdot \frac{k' - (1 + \delta) k''}{(1 + \delta) r + 250 + p + f' + (1 + \delta) f''}.$$

Vitesse du piston, en pieds, par minute.

$$ar = 4{,}100{,}000 \frac{S}{v} \cdot \frac{l + 2c}{l'' + c} \left(\frac{k'}{1 + \delta} - k'' \right) - \frac{a}{1 + \delta} [250 + p + f' + (1 + \delta) f''].$$

Charge utile du piston, en livres.

$$S = \frac{av}{4{,}100{,}000} \cdot \frac{l'' + c}{l + 2c} \cdot \frac{(1 + \delta) r + 250 + p + f' + (1 + \delta) f''}{k' - (1 + \delta) k''}.$$

Vaporisation effective, en pieds cubes d'eau, par minute.

E. u. $= arv$. . . . . Effet utile, en livres élevées à 1 pied par minute.

E. u. ch. $= \frac{arv}{33000}$. . . . . Effet utile, en chevaux.

E. u. 1 lb. co. $= \frac{arv}{N}$. . . . . Effet utile de 1 livre de combustible, en livres élevées à 1 pied.

E. u. 1 p. e. $= \frac{arv}{S}$. . . . . Effet utile de 1 pied cube d'eau vaporisé, en livres élevées à 1 pied.

Q. co. pr. 1 ch. $= \frac{33000\ N}{arv}$. . . . . Quantité de combustible, en livres, qui produit l'effet d'un cheval.

Q. e. pr. 1 ch. $= \frac{33000\ S}{arv}$. . . . . Quantité d'eau, en pieds cubes, qui produit l'effet d'un cheval.

E. u. ch. pr. 1 lb. co. $= \frac{arv}{33000\ N}$. . . . . Effet, en chevaux, produit par livre de combustible.

E. u. ch. pr. 1 p. e. $= \frac{arv}{33000\ S}$. . . . . Effet, en chevaux, produit par pied cube d'eau vaporisé.

CAS DU MAXIMUM D'EFFET UTILE, AVEC UNE CLÔTURE DE LA SOUPAPE D'ÉQUILIBRE ET UNE DÉTENTE OU UN CONTRE-POIDS QUELCONQUES.

$$v' = 4{,}100{,}000 \frac{l + 2c}{l'' + c} \cdot \frac{l}{l' + c} \cdot \frac{S}{a} \cdot \frac{1}{250 + P}.$$

Vitesse du maximum d'effet utile, en pieds, par minute.

$$ar' = a \frac{l' + c}{l} \left(\frac{k'}{1 + \delta} - k'' \right) (250 + P) - \frac{a}{1 + \delta} [250 + p + f' + (1 + \delta) f''].$$

Charge du maximum d'effet utile, en livres.

$$S = \frac{av'}{4{,}100{,}000} \cdot \frac{l'' + c}{l + 2c} \cdot \frac{l' + c}{l} (250 + P) \ldots$$ Vaporisation effective, en pieds cubes d'eau, par minute.

$$\text{E. u. max.} = ar'v' \ldots\ldots$$ Effet utile maximum, en livres élevées à 1 pied, par minute.

CLÔTURE DE LA SOUPAPE D'ÉQUILIBRE QUI PRODUIT LE MAXIMUM D'EFFET UTILE, AVEC UNE DÉTENTE OU UN CONTRE-POIDS QUELCONQUES.

$$\log \frac{l - l'' + c}{c} = \frac{k'}{1 + \delta} - \frac{1}{1 + \delta} \cdot \frac{l}{l' + c} \cdot \frac{250 + p + f' + (1 + \delta) f''}{250 + P}.$$

Condition qui fixe la clôture la plus favorable de la soupape d'équilibre, ou la valeur de $\frac{l''}{l}$.

DÉTENTE OU CONTRE-POIDS QUI PRODUISENT LE MAXIMUM ABSOLU D'EFFET UTILE.

$$\frac{l'}{l} = \frac{250 + p + f' + (1 + \delta) f''}{250 + P} \ldots\ldots$$ Détente qui produit le maximum absolu d'effet utile.

$$\Pi = \frac{\frac{l' + c}{l} k' (250 + P) - (250 + p + f')}{1 + \delta} - \rho'.$$ Contre-poids correspondant, en livres, par pied carré de la surface du piston.

Nous montrerons l'application de ces formules en calculant une machine de ce système, récemment établie à Londres, à la distribution publique des eaux de Old-ford (*East-London Waterworks*), sous la direction de M. Th. Wicksteed, et sur laquelle cet habile ingénieur a publié une série de cinq expériences aussi remarquables par le soin avec lequel elles ont été conduites que par leur durée. On peut en voir le détail dans son ouvrage : *An experimental inquiry concerning the Cornish and Boulton and Watt pumping engines.* Weale, London, 1841.

La machine présente les dimensions et données suivantes :

Diamètre du cylindre, 80 pouces, ou surface du piston, tige déduite, $a = 34.858$ pieds carrés.

Course du piston, $l = 10$ pieds.

Liberté du cylindre, 0.05 de la course du piston, ou $\frac{c}{l} = 0.05$.

Portion de la course descendante parcourue avant la détente, dans cinq expériences successives :

Exp.	I. . . . . $\frac{l'}{l}$	= 0.603
	II.	= 0.477
	III.	= 0.397
	IV.	= 0.352
	V.	= 0.313

Portion de la course montante parcourue au moment de la clôture de la soupape d'équilibre, 9.85 pieds ; ou $\frac{l''}{l} = 0.985$ (*).

Pression absolue de la vapeur dans la chaudière, dans les cinq expériences respectives :

Exp. I.	P = 30.45 × 144	lbs par pied carré.
II.	34.7 × 144	
III.	42.7 × 144	
IV.	45.7 × 144	
V.	31.7 × 144	

Pression absolue dans le condenseur et dans le cylindre à vapeur, 0.730 livre par pouce carré; ou $p = 0.730 \times 144$ lbs par pied carré.

Vaporisation dans la chaudière, dans les cinq expériences respectives, d'abord mesurée en poids d'après l'observation, puis en pieds cubes par minute. Une partie de la vapeur formée dans la chaudière se condensait dans l'enveloppe du cylindre ; mais, comme cette eau condensée retombait dans la chaudière, on n'en a pas fait déduction.

Exp. I. .	261,968 lbs d'eau,	en 96 heures ;	ou S = 0.72770 pied cube d'eau par minute.
II. .	412,160	en 144	ou S = 0.76330
III .	393,456	en 168	ou S = 0.62454
IV .	355,824	en 154.25	ou S = 0.61514
V. .	269,696	en 117.6	ou S = 0.61160

Consommation de houille de première qualité du pays de Galles, à raison de 1 livre pour 9.493 livres d'eau vaporisée ; ce qui donne, dans les cinq expériences respectives :

Exp. I. . . .	N = 4.791	lbs par minute.
II.	5.025	
III.	4.112	
IV.	4.050	
V.	4.026	

(*) Dans cette machine, la compression de la vapeur au-dessus du piston n'a pas lieu tout à coup, après la clôture de la soupape d'équilibre. Elle se produit graduellement pendant la course du piston ; mais comme, à la fin de cette course, son effet est toujours de contribuer à arrêter le piston, et de mettre en réserve une certaine masse de vapeur qui est utilisée ensuite pour la prochaine course descendante, nous avons calculé, d'après ce qui a été dit art. II, § II de ce chapitre, la clôture subite de la soupape d'équilibre qui produit les mêmes effets, afin d'avoir la valeur de l'' qu'on doit substituer dans les formules. Pour cela il suffit de savoir qu'après sa compression dans la liberté du cylindre, ou dans la longueur $0.05\,l$, la vapeur avait, dans la machine dont il est question, une pression absolue de 8.7 livres par pouce carré, et qu'à l'origine de la course montante, c'est-à-dire avant toute compression, cette vapeur avait une pression de 6.7 livres par pouce carré. Donc, en supposant approximativement que le volume de la vapeur varie en raison inverse de sa force élastique, le volume qu'il en fallait intercepter à la pression originale de 6.7 livres, pour produire la même pression finale et la même réserve de vapeur, devait, d'après la proportion

$$6.7 : 8.7 :: 0.050\,l : 0.065\,l,$$

être représenté par $0.065\,l$. Cette quantité exprime donc la longueur du cylindre dans laquelle la vapeur aurait dû être interceptée, ou la longueur $l - l'' + c$. Ainsi, en faisant attention que $c = 0.050\,l$, on en conclut $l'' = 0.985\,l$.

Charge de la pompe élévatoire mise en jeu dans la course descendante du piston à vapeur et servant à élever l'eau du puits dans la bâche de la pompe foulante, 0.821 livre par pouce carré de la surface du piston à vapeur ; ou $\rho' = 0.821 \times 144$ lbs par pied carré. Cette charge, ainsi que la suivante, a été calculée en supposant que la totalité des pompes se remplit d'eau ; mais cette supposition a été vérifiée par l'expérience directe, en raison de la construction particulière des soupapes de Harvey et West.

Charge de la pompe foulante mise en jeu dans la course montante du piston à vapeur, 10.269 livres par pouce carré de la surface du piston ; ce qui, en y ajoutant le travail de la pompe élévatoire déjà spécifié, donne, pour la charge totale d'eau élevée par la pompe d'épuisement dans une oscillation complète de la machine, 11.090 livres par pouce carré de la surface du piston à vapeur ou $r = 11.090 \times 144$ livres par pied carré.

Contre-poids ou prépondérance du balancier du côté opposé au cylindre, 11.037 livres par pouce carré de la surface du piston ; ou $\Pi = 11.037 \times 144$ livres par pied carré.

Frottement de la machine sans charge, et non compris le travail de ses pompes de service, 0.185 livre par pouce carré de la surface du piston ; et en y ajoutant 0.001 lb par pouce carré pour la pompe d'alimentation, ou pompe d'eau chaude, mise en jeu dans la course montante du piston à vapeur, donne, pour le frottement f'' de la machine dans cette course, 0.186 livre par pouce carré de la surface du piston. De même, dans la course descendante, en ajoutant au frottement sans charge, la résistance de la pompe d'eau froide, savoir, 0.037 livre par pouce carré de la surface du piston, et celle de la pompe d'air, ou 0.117 livre par pouce carré, fait, pour le frottement f' de cette course, y compris le travail des pompes de service, 0.339 livre par pouce carré du piston à vapeur. Ainsi, en rapportant ces mesures au pied carré, on a $f' = 0.339 \times 144$ lbs, et $f'' = 0.186 \times 144$ lbs, ces évaluations comprenant toutefois les frottemens et résistances de l'eau et des plongeurs dans les pompes d'épuisement (*).

(*) Pour obtenir le frottement propre de la machine, M. Wicksteed a pris exactement la valeur du contre-poids ou prépondérance du balancier du côté opposé au cylindre ; et comme c'est cette prépondérance seule qui produit la course montante du piston à vapeur, en élevant la colonne d'eau contenue dans le tuyau d'ascension de la pompe d'eau foulante et celle de la pompe d'alimentation ou d'eau chaude, il en a retranché le poids de ces deux colonnes d'eau, et le reste lui a donné une évaluation approchée du frottement de la machine.

La valeur du frottement obtenue par ce procédé s'est trouvée de 0.200 livre par pouce carré de la surface du piston, mais il est évident que cette évaluation est un peu trop forte. En effet, d'abord la prépondérance du contre-poids, non seulement élève l'eau dans les pompes, mais elle produit encore, à la fin de la course, la compression de la vapeur retenue au-dessus du piston, en la faisant passer de la pression de 6.7 à celle de 8.7 livres par pouce carré. En évaluant le travail dû à cette compression comme s'il avait eu lieu après la clôture de la soupape d'équilibre, on voit qu'il est représenté par une résistance moyenne de $\frac{8.7-6.7}{2} = 1$ lb par pouce carré, surmontée pendant les 0.015 de la course, ou, si l'on veut, par une résistance de 0.015 livre par pouce carré, surmontée pendant la longueur totale l de la course. En retranchant donc cette résistance de l'évaluation précédente, il reste, pour la valeur du frottement, 0.185 livre par pouce carré.

En outre, cette dernière valeur comprend encore le frottement de l'eau et des plongeurs dans les pompes d'épuisement, puisque ce frottement est également surmonté par la prépondérance du contre-poids ; mais comme nous manquons d'élémens pour tenir compte de cette circonstance, nous nous contenterons de l'indiquer, en faisant toutefois remarquer qu'elle nous dispensera d'avoir une déduction à faire de l'effet utile pour cet objet.

Si l'on introduit ces données dans les formules pratiques présentées plus haut, pour avoir la vitesse que devait prendre la machine dans chacun des cas spécifiés, et que l'on rapproche les résultats ainsi obtenus de ceux qui ont été donnés par l'expérience et constatés par M. Wicksteed, on formera le tableau suivant :

Effets de la machine, avec le règlement des expériences.

	Durée de l'expérience.	Détente de la vapeur.	Vitesse de l'expérience.	Vitesse de la formule.
Exp. I. . .	96 heures.	$\frac{l'}{l}$ = 0.603	... 60.35	... 58.59 pieds par minute.
II.. .	144	0.477	... 73.81	... 69.92
III. .	168	0.397	... 62.95	... 62.28
IV. .	154.25	0.352	... 64.23	... 65.02
V.. .	117.6	0.313	... 69.87	... 67.84

On voit d'abord, par ce tableau, que, dans une suite d'expériences aussi longues et aussi différentes sous le rapport de la détente de la vapeur, il y a un accord très-remarquable des résultats du calcul avec les faits.

Ensuite, si l'on suppose la machine réglée à diverses autres détentes, et que, pour chacune de ces détentes, on adopte le contre-poids, la clôture de la soupape d'équilibre et la charge du piston le plus favorables à l'effet utile de la machine, la vaporisation et la consommation de combustible étant d'ailleurs prises à la moyenne des expériences précédentes, savoir, $S = 0.66846$ pieds cubes d'eau et $N = 4.401$ livres de houille par minute, et la pression absolue dans la chaudière étant prise à 30 livres par pouce carré, ou $P = 30 \times$ par 144 lbs par pied carré, on formera le tableau suivant :

Effets de la machine avec diverses détentes et avec le contre-poids, la clôture de la soupape d'équilibre et la charge du piston, le plus favorables pour chacune de ces détentes respectives.

			Maximum d'effet utile.
$\frac{l'}{l}$	= 0.30	... 0.20	... 0.10
$\frac{\Pi}{144}$	= 29.82	... 23.83	... 15.85
$\frac{l''}{l}$	= 0.78	... 0.71	... 0.62
v'	= 38.22	... 58,44	... 110.48
ar'	= 131,636	... 99,076	... 60,890
$\frac{r'}{144}$	= 26.22	... 19.74	... 12.13
S	= 0.66846	... 0.66846	... 0.66846
E.u	= 5,031,000	... 5,789,600	... 6.727.000

			Maximum d'effet utile.
E. u. ch.	= 152	... 175	... 204
E. u. 1 lb. co. . . .	= 1,143,150	... 1,315,300	... 1,528,300
E. u. 1 p. e.	= 7,546,100	... 8,684,000	... 10,090,000
Q. co. pr. 1 ch. . .	= 0.029	... 0.025	... 0.022
Q. e. pr. 1 ch. . . .	= 0.00437	... 0.00380	... 0.00327
E. u. ch. pr. 1 lb. co.	= 34.64	... 39.86	... 46.32
E. u. ch. pr. 1 p. e. .	= 229	... 263	... 306

En examinant ces résultats, et observant d'ailleurs que, dans l'expérience V, avec une détente $\frac{l'}{l} = 0.313$, un contre-poids de 11.037 livres par pouce carré et une charge de 11.09 lbs. par pouce carré de la surface du piston, la machine a pris une vitesse de 69.87 pieds par minute, ce qui lui donne un effet utile de

3,889,500 livres élevées à 1 pied par minute,

on verra, 1°. que si l'on veut s'en tenir à la détente $\frac{l'}{l} = 0.30$, pour ne pas rendre le mouvement trop irrégulier, on peut porter l'effet utile de la machine à 5,031,000 lbs, en lui donnant un contre-poids de 29.82 lbs et une charge de 26.22 livres par pouce carré du piston; 2°. que si, au contraire, on ne craint pas de changer la détente, mais qu'on veuille conserver à peu près la même vitesse du piston, on peut obtenir de la machine un effet utile de 5,789,600 lbs, en adoptant une détente $\frac{l'}{l} = 0.20$, un contre-poids de 23.83 lbs et une charge de 19.74 lbs par pouce carré du piston; 3°. enfin, que si l'on n'est astreint qu'à conserver à peu près la même charge, on peut porter l'effet utile de la machine à 6,727,000 lbs, en adoptant une détente $\frac{l'}{l} = 0.10$ et un contre-poids de 15.85 lbs avec la charge de 12.13 livres par pouce carré de la surface du piston.

Ces résultats montrent l'usage qu'on peut faire des formules. On voit qu'elles servent à reconnaître, sans recourir à l'expérience, quelles sont les combinaisons les plus avantageuses à l'effet utile de la machine; et, par conséquent, en adoptant, parmi ces combinaisons, celles qui sont admissibles dans la pratique en général, ou celles qui peuvent convenir au cas spécial dont on s'occupe, on aura le moyen, sinon de parvenir au maximum absolu d'effet utile de la machine, ce qui n'est pas possible, du moins de s'en approcher autant que les conditions du travail le permettront.

Pour rapporter les mêmes formules aux mesures françaises, il faut y prendre, pour les constantes, les valeurs suivantes :

Constantes du volume spécifique de la vapeur,

$$m = 20,000,000,$$
$$n = 1200.$$

Pression dans la chaudière, variable dans les différentes machines, mais le plus ordinairement entre 3.5139 et 5.6222 kilogrammes par centimètre carré; ce qui donne P=35139 ou 56222 kilogrammes par mètre carré.

Pression de condensation dans le cylindre, variable selon la perfection des machines, mais dans les bonnes machines, 0.0527 kilogramme par centimètre carré, ou $p = 527$ kilogrammes par mètre carré.

Frottement de la machine sans charge, dans la course descendante, en y comprenant le travail de la pompe d'air et de la pompe d'eau froide, et en représentant par d le diamètre du cylindre exprimé en pieds, $f' = \frac{485}{d}$ kilogrammes par mètre carré; et dans la course montante, y compris le travail de la pompe d'eau chaude ou d'alimentation, $f'' = \frac{266}{d}$ kilogrammes par mètre carré de la surface du piston; cette évaluation des frottemens comprenant toutefois la résistance de l'eau et des plongeurs dans la pompe d'épuisement.

Frottement additionnel de la machine dû à la charge, 0.07 du poids de cette charge, ou $\delta = 0.07$.

Vaporisation effective égale à la vaporisation brute de la chaudière, l'eau entraînée à l'état liquide avec la vapeur se vaporisant pendant la course, par l'effet de la chaleur communiquée au cylindre par son enveloppe.

En substituant dans les équations les valeurs de m et n, et laissant les autres substitutions à faire, selon les machines considérées, on obtient les formules numériques suivantes.

Formules pratiques pour les machines de Cornwall à simple action (mesures françaises).

CAS D'UNE CHARGE OU D'UNE VITESSE QUELCONQUES, AVEC UNE CLÔTURE DE LA SOUPAPE D'ÉQUILIBRE ET UNE DÉTENTE OU UN CONTRE-POIDS QUELCONQUES.

$$v = 20{,}000{,}000\,\frac{S}{a}\cdot\frac{l+2c}{l'+c}\cdot\frac{k'-(1+\delta)k''}{(1+\delta)r+1200+p+f'+(1+\delta)f''}.$$

Vitesse du piston, en mètres, par minute.

$$ar = 20{,}000{,}000\,\frac{S}{v}\cdot\frac{l+2c}{l'+c}\left[\frac{k'}{1+\delta}-k''\right]-\frac{a}{1+\delta}\left[1200+p+f'+(1+\delta)f''\right].$$

Charge utile du piston, en kilogrammes.

$$S = \frac{av}{20{,}000{,}000}\cdot\frac{l'+c}{l+2c}\cdot\frac{(1+\delta)r+1200+p+f'+(1+\delta)f''}{k'-(1+\delta)k''}.$$

Vaporisation effective, en mètres cubes d'eau, par minute.

$\text{E. u.} = arv$. . . . . Effet utile, en kilogrammes élevés à 1 mètre, par minute.

$\text{E. u. ch.} = \frac{arv}{4500}$ . . . . Effet utile, en chevaux.

$\text{E. u. 1 k. co.} = \frac{arv}{N}$ . . . . Effet utile de 1 kilogramme de combustible, en kilogrammes élevés à un mètre.

$\text{E. u. 1 m. e.} = \frac{arv}{S}$ . . . . Effet utile de 1 mètre cube d'eau vaporisé, en kilogrammes élevés à 1 mètre.

$\text{Q. co. pr. 1 ch.} = \frac{4500\,N}{arv}$ . . . . Quantité de combustible, en kilogrammes, qui produit l'effet d'un cheval.

$\text{Q. e. pr. 1 ch.} = \frac{4500\,S}{arv}$ . . . . Quantité d'eau, en mètres cubes, qui produit l'effet d'un cheval.

$\text{E. u. ch. pr. 1 k. co.} = \frac{arv}{4500\,N}$ . . . . Effet utile, en chevaux, produit par kilogramme de combustible.

$\text{E. u. ch. pr. 1 m. e.} = \frac{arv}{4500\,S}$ . . . . Effet utile, en chevaux, produit par mètre cube d'eau vaporisé.

CAS DU MAXIMUM D'EFFET UTILE, AVEC UNE CLÔTURE DE LA SOUPAPE D'ÉQUILIBRE ET UNE DÉTENTE OU UN CONTRE-POIDS QUELCONQUES.

$$v' = 20{,}000{,}000\,\frac{l+2c}{l''+c}\cdot\frac{l}{l'+c}\cdot\frac{S}{a}\cdot\frac{1}{1200+P}.$$ Vitesse du maximum d'effet utile, en mètres, par minute.

$$ar' = a\,\frac{l'+c}{l}\left(\frac{k'}{1+\delta}-k''\right)(1200+P)-\frac{a}{1+\delta}\left[1200+p+f'+(1+\delta)f''\right].$$

Charge du maximum d'effet utile, en kilogrammes.

$$S = \frac{av'}{20{,}000{,}000}\cdot\frac{l''+c}{l+2c}\cdot\frac{l'+c}{l}(1200+P).$$ Vaporisation effective, en mètres cubes d'eau, par minute.

$\text{E. u. max.} = ar'v'$. . . . . Effet utile maximum, en kilogrammes élevés à 1 mètre, par minute.

CLÔTURE DE LA SOUPAPE D'ÉQUILIBRE QUI PRODUIT LE MAXIMUM D'EFFET UTILE, AVEC UNE DÉTENTE OU UN CONTRE-POIDS QUELCONQUES.

$$\log\frac{l-l''+c}{c} = \frac{k'}{1+\delta}-\frac{1}{1+\delta}\cdot\frac{l}{l'+c}\cdot\frac{1200+p+f'+(1+\delta)f''}{1200+P}.$$

Condition qui fixe la clôture la plus favorable de la soupape d'équilibre, ou la valeur de $\frac{l'}{l}$.

DÉTENTE, OU CONTRE-POIDS, QUI PRODUISENT LE MAXIMUM ABSOLU D'EFFET UTILE.

$$\frac{l'}{l} = \frac{1200 + p + f' + (1 + \delta) f''}{1200 + P} \ldots\ldots$$ Détente qui produit le maximum absolu d'effet utile.

$$\Pi = \frac{\frac{l' + c}{l} k' (1200 + P) - (1200 + p + f')}{1 + \delta} - \rho'.$$

Contre-poids correspondant, en kilogrammes, par mètre carré de la surface du piston.

Si l'on veut soumettre au calcul la machine de ce système établie à Old-ford, à Londres, pour la distribution publique des eaux, et dont nous avons donné plus haut le calcul en mesures anglaises, on aura d'abord, pour les dimensions de la machine, les données suivantes :

Diamètre du cylindre, 2.032 mètres ; ou surface du piston, tige déduite, $a = 3.2382$ mètres carrés.

Course du piston, $l = 3.048$ mètres.

Liberté du cylindre, 0.05 de la course totale, ou $\frac{c}{l} = 0.05$

Portion de la course descendante parcourue avant la détente, dans les cinq expériences successives :

Exp. I. .... $\frac{l'}{l} = 0.603$

II. 0.477

III. 0.397

IV. 0.352

V. 0.343

Portion de la course montante parcourue au moment de la clôture virtuelle de la soupape d'équilibre, $\frac{l''}{l} = 0.985$.

Pression absolue de la vapeur dans les cinq expériences respectives :

Exp. I. .... P = 21399 kilogrammes par mètre carré.

II. 24386

III. 30009

IV. 32117

V. 36334

Pression absolue dans le condenseur et dans le cylindre à vapeur, 0.0343 kilogramme par centimètre carré ; ou $p = 343$ kilogrammes par mètre carré.

Vaporisation dans la chaudière, dans les cinq expériences respectives, d'abord mesurée en poids d'après l'observation, puis exprimée en mètres cubes par minute :

Exp. I. . . 118,779	kilogr. d'eau en 96	heures ; ou	S = 0.020604 mètre cube par minute.
II. . . 186,880	144		S = 0.021611
III. . 178,398	168		S = 0.017685
IV. . 161,338	154.25		S = 0.017417
V. . . 122,278	117.6		S = 0.017316

Consommation de houille de première qualité du pays de Galles, à raison de 1 kilogramme pour 9.493 kilogrammes d'eau vaporisée ; ce qui donne, dans les cinq expériences respectives :

Exp. I.	N = 2.1724 kilogrammes par minute.
II.	2.2785
III.	1.8644
IV.	1.8364
V.	1.8255

Charge de la pompe élévatoire du fond du puits, mise en jeu dans la course descendante du piston à vapeur, et servant à élever l'eau du puits dans la bâche de la pompe foulante, 0.0577 kilogramme par centimètre carré de la surface du piston à vapeur ; ou $\rho' = 577$ kilogrammes par mètre carré.

Charge de la pompe foulante mise en jeu dans la course montante du piston à vapeur, 0.7218 kilogramme par centimètre carré de la surface du piston ; ce qui, en y ajoutant le travail de la pompe élévatoire déjà spécifié, donne, pour la charge totale d'eau élevée par la pompe d'épuisement dans une oscillation complète de la machine, 0.7794 kilogramme par centimètre carré de la surface du piston à vapeur ; ou $r = 7794$ kilogrammes par mètre carré.

Contre-poids ou prépondérance du balancier du côté opposé au cylindre, 0.7757 kilogramme par centimètre carré de la surface du piston ; ou $\Pi = 7757$ kilogrammes par mètre carré.

Frottement de la machine sans charge, et non compris le travail de ses pompes de service, 0.0130 kilogramme par centimètre carré de la surface du piston ; et en y ajoutant 0.0001 kilogramme par centimètre carré, pour la pompe d'alimentation ou d'eau chaude mise en jeu dans la course montante du piston à vapeur, donne pour le frottement f'' de la machine dans cette course, 0.0131 kilogramme par centimètre carré de la surface du piston. De même, dans la course descendante, en ajoutant au frottement sans charge la résistance de la pompe d'eau froide, savoir, 0.0026 kilogramme par centimètre carré de la surface du piston, et celle de la pompe d'air, ou 0.0082 kilogramme par centimètre carré, fait, pour le frottement f' de cette course, y compris le travail des pompes de service, 0.0238 kilogramme par centimètre carré du piston à vapeur. Ainsi $f' = 238$ kilogrammes par mètre carré, et $f'' = 131$ kilogrammes par mètre carré de la surface du piston, ces évaluations comprenant toutefois les frottemens et résistances de l'eau et des plongeurs dans les pompes d'épuisement.

Cela posé, si l'on introduit ces données dans les formules pratiques présentées plus haut, pour avoir la vitesse que devait prendre la machine dans chacun des

cas spécifiés, et que l'on rapproche les résultats ainsi obtenus de ceux qui ont été donnés par l'expérience, on forme le tableau suivant.

Effets de la machine, avec le règlement des expériences.

	Durée de l'expérience.	Détente de la vapeur.	Vitesse de l'expérience.	Vitesse de la formule.
Exp. I. . . .	96 heures;	$\frac{l'}{l} = 0.603$	18.394	17.857 mètres par minute.
II. . .	144	0.477	22.497	21.312
III. . .	168	0.397	19.187	18.982
IV. . .	154.25	0.352	19.577	19.817
V. . .	117.6	0.313	21.296	20.667

Ensuite, si l'on suppose la machine réglée à diverses autres détentes, et que, pour chacune de ces détentes, on adopte le contre-poids, la clôture de la soupape d'équilibre et la charge du piston le plus favorables à l'effet utile de la machine, la vaporisation et la consommation du combustible étant d'ailleurs prises à la moyenne des expériences précédentes, savoir : S = 0.018927 mètre cube d'eau par minute, N = 1.9954 kilogramme de houille par minute, et la pression absolue dans la chaudière étant supposée de 3.5139 kilogrammes par centimètre carré, ou P = 35139 kilogrammes par mètre carré, on formera le tableau suivant.

Effets de la machine avec diverses détentes et avec le contre-poids, la clôture de la soupape d'équilibre et la charge du piston, le plus favorables pour chacune de ces détentes respectives.

			Maximum d'effet utile.
$\frac{l'}{l}$	= 0.30	... 0.20	... 0.10
$\frac{\text{n}}{10000}$	= 2.0956	... 1.6746	... 1.1139
$\frac{l''}{l}$	= 0.78	... 0.71	... 0.62
v'	= 11.649	... 17.811	... 33.672
ar'	= 59,685	... 44,922	... 27,608
$\frac{r'}{10000}$	= 1.8432	... 1.3873	... 0.8526
S.	= 0.018927	... 0.018927	... 0.018927
E. u.	= 695,250	... 800,100	... 929,630
E. u. ch.	= 154	... 178	... 207
E. u. 1 k. co. . . .	= 348,420	... 400,960	... 465,880
E. u. 1 m. e. . . .	= 36,734,000	... 42,274,000	... 49,118,000
Q. co. pr. 1 ch. . .	= 0.0129	... 0.0112	... 0.0097
Q. e. pr. 1 ch. . .	= 0.000123	... 0.000106	... 0.000092
E. u. ch. pr. 1 k. co.	= 77.43	... 89.10	... 103.50
E. u. ch. pr. 1 m. e.	= 8163	... 9394	... 10915

Pour les conséquences à tirer de ces résultats, nous renvoyons à ce qui a été dit relativement au même calcul en mesures anglaises.

§ II. *Des causes qui rendent l'effet utile des machines de Cornwall à simple action supérieur à celui de toutes les autres machines à vapeur.*

L'effet utile des machines de Cornwall à simple action a été révoqué en doute, comme théoriquement impossible, par presque tous les auteurs qui se sont occupés de ces matières; tout récemment encore, en 1838, ce sujet a été, à Londres, l'objet d'une discussion sérieuse entre les ingénieurs qui avaient mesuré cet effet utile sur les lieux et ceux qui persistaient à chercher des causes d'erreur dans la manière de le constater; enfin, en ce moment, on ne conteste plus l'exactitude des faits observés, mais un ingénieur anglais cherche à en rendre compte au moyen d'une certaine action de la vapeur, indépendante de sa force élastique, et consistant en un choc exercé par la vapeur contre le piston au moment de sa pénétration dans le cylindre. Comme cependant on a vu que les formules présentées dans ce chapitre conduisent à des résultats conformes à l'expérience, par l'application des mêmes principes que pour toutes les autres machines à vapeur, il nous a paru nécessaire d'expliquer plus particulièrement les causes qui rendent l'effet des machines de Cornwall à simple action supérieur à celui de toutes les autres machines à vapeur des divers systèmes.

D'après les expériences que nous avons rapportées, l'effet utile de la machine de Cornwall établie à Old-ford, quand on y arrête l'admission de la vapeur dans le cylindre à 0.313 de la course totale, s'élève à 3,889,300 livres élevées à 1 pied par minute, et la consommation de houille dans le même temps est de 4.026 livres. Ce résultat revient, en mesures anglaises, à 90,800,000 livres élevées à 1 pied par boisseau de 94 livres de combustible, ou, en mesures françaises, à une dépense de 0.93 kilogramme de combustible par 60 chevaux, ou par ce qu'on appelle force de cheval par heure; et l'expérience prouve, ainsi que le calcul, que cet effet utile pourrait s'élever bien plus haut encore si l'on faisait travailler la machine à une plus grande détente de la vapeur. D'autre part, dans les meilleures machines de Watt à double action, qui sont les plus connues, on ne voit guère l'effet utile dépasser 28,000,000 de livres élevées à 1 pied par boisseau de houille, ou, en mesures françaises, on ne voit guère l'effet d'un cheval par heure être produit à moins de 3 kilogrammes de houille. Les machines de Cornwall ont donc, sur celles de Watt à double action, une très-grande supériorité, et, si l'on veut en rechercher les causes, on trouvera qu'elles sont de trois sortes: celles qui tiennent à la construction plus économique du foyer et de la chaudière, celles qui tiennent à un système de pompe plus avantageux, et, enfin, celles qui tiennent au système de la machine elle-même.

1°. Relativement à la construction du foyer et de la chaudière, Watt a établi,

d'après sa propre expérience, que, dans la chaudière-wagon en usage dans ses machines, pour vaporiser un pied cube, ou 62.5 livres d'eau, il faut, en général, un poids de 8.4 livres de houille de première qualité; et, dans quelques cas seulement, on a vu cette quantité se réduire à 7.24 livres. Mais dans la chaudière à foyer intérieur, employée dans les machines de Cornwall, la même vaporisation n'exige en général, que 6.75 livres de houille, et même quelquefois 6.0 livres seulement. Il y a donc d'abord sous ce rapport, une différence assez considérable entre les deux espèces de machines.

2°. Relativement au travail des pompes d'épuisement, il faut remarquer qu'avec les autres machines, et avec les machines de Watt à simple action en particulier, on emploie des pompes élévatoires à clapets. Dans les machines de Cornwall, au contraire, comme l'épuisement se produit pendant la chute du contre-poids, ou pendant la descente de la tige des pompes, celles-ci, hors celle du fond, sont toujours des pompes foulantes *à plongeurs*. Or, on sait que ces pompes ont beaucoup moins de frottement que les pompes élévatoires, parce que les plongeurs agissent sans clapets et sans garniture de cuir. En outre, comme les pompes à plongeurs ne peuvent éprouver aucune fuite qu'elle ne soit aussitôt visible au dehors, qu'il suffit pour l'empêcher de serrer les écrous de l'étoupage, et, enfin, que les plongeurs n'ont point de clapets qui permettent à l'eau de retomber après avoir été élevée, il s'ensuit qu'elles laissent perdre une moindre portion de l'effet utile réellement produit par la vapeur.

3°. Dans les machines de Cornwall, le cylindre est contenu dans une chemise ou second cylindre de métal dans lequel pénètre librement la vapeur de la chaudière, et le tout est de plus renfermé dans une enveloppe de bois remplie de cendres tamisées. Dans quelques machines, il y a un feu particulier allumé sous le cylindre et sous les boites à vapeur. Une disposition à peu près semblable est bien employée aussi dans les grandes machines de Watt; mais comme, dans ces dernières, la température de la chaudière n'est ordinairement que de 217 degrés du thermomètre Fahrenheit, ou 103 degrés du thermomètre centigrade environ, tandis que, dans les machines de Cornwall, en raison de la haute pression de la vapeur, la température s'élève à 282 degrés de Fahrenheit, ou 140 degrés centigrades et au delà, on conçoit que son efficacité pour réchauffer le cylindre doit être beaucoup plus considérable. Or, dans toutes les machines à vapeur, il y a toujours une quantité notable d'eau entraînée à l'état liquide et mélangée avec la vapeur. L'effet d'un réchauffement considérable du cylindre doit donc être, dans les machines de Cornwall, de vaporiser cette eau elle-même pendant la durée de la course du piston, et de la faire ainsi concourir à la production de l'effet utile; tandis que, dans les machines de Watt, la température n'est pas assez différente, du dehors au dedans du cylindre, pour qu'un semblable effet se produise, et, par conséquent, une portion de l'eau échauffée dans la chaudière est perdue.

Nous ajouterons que, dans les machines de Watt, l'eau condensée dans l'enveloppe du cylindre est conduite au dehors par un tuyau particulier, et qu'il en résulte une perte d'environ 0.02 de la vaporisation totale, tandis que, dans les machines de Cornwall, cette perte est évitée, parce que l'eau, ainsi condensée, retourne à la chaudière.

4°. Relativement au frottement propre et au frottement additionnel de la machine par unité de la charge, nous avons déjà fait remarquer, d'après l'expérience, qu'à dimensions égales du cylindre, il est à peu près moitié dans les machines de Cornwall que dans celles de Watt à double action ; il en résulte donc un nouvel avantage en faveur des premières. Cette circonstance tient à un travail très-perfectionné, à ce que les machines de Cornwall n'ont pas, en général, de pompe d'eau froide, celle-ci étant fournie par le travail même de la machine, et enfin, à ce que les soupapes coniques y sont remplacées par des soupapes à double siége, qui n'exigent qu'un effort beaucoup plus faible pour les soulever.

5°. Le vide du condenseur est bien plus parfait dans les machines de Cornwall que dans les machines de Watt à double action ; et cet effet provient surtout de ce que les premières, étant employées aux épuisemens, se trouvent abondamment pourvues d'eau froide, sans aucun travail de la machine ; tandis que, dans les machines employées aux manufactures, le surplus d'eau froide nécessaire pour produire une condensation plus complète exige un travail additionnel, qui peut être considérable quand l'eau doit être puisée à une grande profondeur.

En outre, dans les machines de Cornwall, les soupapes, d'après leur forme, ouvrent subitement une très-large sortie à la vapeur, et la lenteur du mouvement donne plus de temps pour la condensation complète de la vapeur ; tandis que, dans les machines de Watt à double action, où l'on emploie des tiroirs ou des soupapes coniques, leur ouverture n'est que graduelle, le mouvement est plus rapide, et il a lieu sans intervalle de repos. Cette circonstance, jointe à la puissance de la pompe d'air, fait donc que, dans les machines de Cornwall, la pression de condensation dans le cylindre est sensiblement la même que dans le condenseur, tandis que, dans les machines de Watt, on estime ordinairement qu'elle s'élève à 4 livres dans le cylindre, lorsqu'elle est de 1.25 livre dans le condenseur.

6°. Les machines de Cornwall sont à haute pression, tandis que celles de Watt sont à basse pression, et cette circonstance est une grande cause de supériorité en faveur des premières. En effet, dans les machines de 80 pouces dont nous avons mentionné plus haut le frottement moyen et la pression dans le condenseur, ces deux résistances ensemble s'élevaient à environ 0.892 livre par pouce carré. Mais, en raison de la pression dans la chaudière, la charge utile de la machine était de 11 livres par pouce carré, et aurait pu être beaucoup plus élevée ; donc, la résistance provenant des deux causes ci-dessus n'était que $\frac{1}{12}$ environ de la charge utile. Dans une machine de Watt de mêmes dimensions, au contraire, l'ensemble

des deux mêmes résistances s'élèverait, en général, d'après ce que nous avons dit il y a un instant, à 4.30 livres par pouce carré. D'un autre côté, comme la pression dans la chaudière n'est que de 16.50 livres, la charge utile n'excède pas 8 livres par pouce carré, ou 9 livres au plus. On voit donc que les deux mêmes résistances absorberaient ici la moitié de la charge utile, au lieu d'en absorber le douzième seulement. On doit remarquer, en passant, que cet avantage appartient à toutes les machines à haute pression comparativement à celles qui sont à basse pression.

7°. Enfin, ce qui constitue l'avantage principal des machines de Cornwall consiste dans la détente de la vapeur, et cet avantage est d'autant plus grand que la détente est poussée plus loin. Dans les machines de Watt à double action, qui nous servent en ce moment de point de comparaison, on ne fait aucun usage de la détente de la vapeur. Dans les machines de Watt à simple action, on emploie la détente jusqu'à certaines limites, en interceptant la vapeur environ aux deux tiers de la course du piston; et, dans ce cas, on voit quelquefois l'effet utile s'élever à près de 40 millions de livres élevées à 1 pied par boisseau de combustible, ou, en mesures françaises, on voit l'effet utile de 60 chevaux, désigné dans la pratique sous le nom de force de cheval par heure, se produire par 2.11 kilogrammes de combustible. Mais, dans les machines de Cornwall à simple action, on pousse la détente bien plus loin encore, puisque, quand la charge le permet, on arrête l'arrivée de la vapeur dans le cylindre après $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{6}$ et même $\frac{1}{10}$ seulement de la course parcourue. On conçoit donc qu'il doit en résulter de bien plus grands avantages en faveur de ces machines.

On doit remarquer, en effet, que, dans les machines de Cornwall, la pression dans la chaudière étant très-considérable, la vapeur peut pénétrer dans le cylindre, au commencement de la course du piston, avec une pression de beaucoup supérieure à la résistance du contre-poids. Or, on sait que la pression *moyenne* de la vapeur pendant la course n'a besoin que d'être égale à la résistance qui lui est opposée; donc, à la fin de la course du piston, la vapeur doit se trouver dans le cylindre à une pression beaucoup plus faible que la résistance qu'elle a soulevée. Ainsi, dans ces machines, il y a très-peu de force non utilisée, puisque la vapeur en sort avec une pression très-faible, ou, si l'on veut, en emportant avec elle une quantité de calorique très-peu considérable, ce qui n'aurait pas lieu si, comme dans les machines sans détente, la vapeur agissait pendant toute la course du piston avec une pression égale à la résistance qu'elle surmonte. On voit en même temps que ce serait méconnaître les effets de la détente, ou le principe même dont on fait usage, que de s'étonner qu'à la fin de la course descendante du piston, la vapeur contenue dans le cylindre s'y trouve à une pression moindre que le contre-poids qu'elle a soulevé, ou que le piston commence de lui-même sa course rétrograde avant l'ouverture de la soupape d'équilibre. C'est

donc à tort que cette circonstance, jointe à une évaluation beaucoup trop élevée des frottemens, a pu conduire à la conclusion que, dans les machines de Cornwall, la force élastique de la vapeur est insuffisante pour surmonter la résistance, et qu'on doit, pour expliquer les effets produits, recourir à la supposition d'une espèce de *choc* qui serait, dans ces machines, imprimé sur le piston par la vapeur, au moment de son admission dans le cylindre.

Les perfectionnemens que nous venons de signaler dans les machines de Cornwall ont été obtenus graduellement, et ils sont dus à l'usage établi dans les mines de ce comté de faire constater par une commission d'ingénieurs, et publier mensuellement, le résumé du travail produit par chacune des machines employées à l'épuisement, ainsi que la consommation correspondante de combustible. Il en est résulté, entre les ingénieurs chargés de la construction des machines, une rivalité qui, de 1811 à 1840, a fait monter l'effet utile de ces machines de 20 millions à 80 millions et même 125 millions de livres élevées à un pied par boisseau de combustible. La différence entre les résultats actuels des différentes machines de ce système provient principalement du degré de détente auquel l'état de la mine permet de faire travailler chacune d'elles, car on ne peut employer une grande détente que quand la charge est faible, ou la mine encore peu profonde.

CHAPITRE XIII.

MACHINES ATMOSPHÉRIQUES.

ARTICLE I.

DESCRIPTION DE LA MACHINE.

Les machines atmosphériques sont des machines *à simple action, à basse pression*, *à détente et à condensation*, dans lesquelles l'effet utile se produit pendant la condensation de la vapeur et en vertu de la pression atmosphérique. Dans ces machines, la vapeur est d'abord introduite sous le piston, pour le soulever avec l'aide d'un contre-poids attaché à l'extrémité opposée du balancier ; ensuite, cette vapeur est condensée, et le piston, pressé sur sa face supérieure par la pression atmosphérique, redescend au fond du cylindre en fesant monter la charge, c'est-à-dire l'eau d'épuisement des pompes à une hauteur correspondante, et en relevant en même temps le contre-poids. Alors, une nouvelle quantité de vapeur est admise dans le cylindre, le piston est élevé de nouveau, et l'action se continue comme auparavant.

La *pl. XXI* représente une machine de ce système. Elle a trois chaudières, de forme à peu près sémi-sphérique : une placée sous le cylindre, comme on le voit sur la figure, et les deux autres placées dans des chambres latérales. Toutes trois sont d'ailleurs munies de robinets de niveau et de soupapes de sûreté, et la vapeur y est formée sous une pression qui excède de 1 livre à 1.5 livre la pression de l'atmosphère.

Le cylindre à vapeur est représenté en C. Il est ouvert à sa partie supérieure, et parcouru par un piston de fonte C', garni de chanvre et constamment recouvert d'une couche d'eau très-mince, destinée à s'opposer aux fuites de vapeur autour du piston. Cette eau est amenée du réservoir d'eau froide H, par un petit tuyau h', dont le passage est limité à la grandeur convenable au moyen du robinet h''. A sa partie inférieure, le cylindre se termine par une concavité sphérique dans laquelle s'amasse l'eau d'injection et de condensation pendant la course descendante. Cette portion du cylindre porte quatre tuyaux que l'on reconnaît sur la figure. Le tuyau A sert à l'admission de la vapeur de la chaudière sous le piston,

quand le régulateur est ouvert, comme on le dira plus loin ; le tuyau I sert à l'injection de l'eau froide dans le cylindre, quand on veut y condenser la vapeur; le tuyau *e* sert à l'éduction ou à la sortie de l'eau provenant de l'injection et de la condensation ; et enfin, le tuyau *u* sert à l'expulsion de l'air et des gaz qui subsistent dans le cylindre, après la condensation de la vapeur. Nous expliquerons d'abord la disposition de ces quatre portions de l'appareil.

D'après l'opération de la machine, on conçoit que le tube d'admission A doit être ouvert chaque fois que le piston doit fournir une course montante. A cet effet, son orifice inférieur est fermé par un régulateur *a*, dont nous avons déjà expliqué la construction chap. III, § III et *fig.* 55 et 56, *pl. VIII.* Il consiste en une lame de métal taillée en secteur et montée sur un axe vertical a', qui sort de la chaudière en se terminant, à son sommet, par un carré portant une poignée à levier a''. En tournant cette poignée, on fait tourner le secteur, et, par conséquent, on peut, soit amener le secteur en face de l'entrée du tube A, ce qui ferme complètement le passage de la vapeur, soit le retirer entièrement, ce qui laisse le passage de la vapeur ouvert en totalité, soit enfin amener le secteur partiellement en face de l'ouverture, ce qui permet de régler le passage de la vapeur au degré précis que l'on veut. Le tube A s'élève assez haut dans l'intérieur du cylindre pour que l'eau de condensation ne puisse s'y amasser.

Le tube d'injection I doit être ouvert chaque fois que le piston doit fournir une course descendante, et se fermer ensuite. A cet effet, il porte un robinet ordinaire *i*, qui, selon qu'il est ouvert ou fermé, au moyen du petit levier i', produit ou suspend l'injection d'eau froide dans le cylindre. Cette eau est d'ailleurs contenue dans le réservoir d'eau froide H, situé à la partie la plus élevée du bâtiment, afin que l'eau d'injection, lancée par l'orifice du tuyau I, vienne frapper avec force le dessous du piston et se divise en jets partiels dans toute la capacité du cylindre. Pour éviter que l'eau du réservoir H ne se répande dans le cylindre, pendant les interruptions du travail, on ferme la sortie du réservoir par une vanne *h*, lorsque la machine est arrêtée.

Le tube d'éduction *e* est fixé au point le plus bas du cylindre, et plonge à son extrémité inférieure dans le réservoir d'eau chaude qu'on voit représenté en M. Ce tube est très-large, pour que l'eau amassée dans le fond du cylindre par suite de l'injection et de la condensation de la vapeur, puisse s'y loger et offrir par là une moindre surface refroidissante à la vapeur, lorsqu'elle arrive de la chaudière. L'orifice supérieur du tube est toujours ouvert; mais, à sa partie inférieure, ou dans le réservoir d'eau chaude, il est fermé par un clapet, ouvrant en dehors seulement. Il en résulte que, pendant la course descendante du piston, l'eau de condensation et d'injection qui remplit le fond du cylindre pénètre dans le tuyau, et se trouve d'abord retenue par le clapet, à cause de la pression extérieure de l'atmosphère; mais, sitôt qu'une nouvelle dose de vapeur est admise de la chaudière dans le

cylindre, la force élastique de cette vapeur, en pressant sur la surface de l'eau contenue dans le tube, ouvre le clapet et force l'eau de s'écouler dans le réservoir d'eau chaude. Cet écoulement continue tant que la pression de la vapeur dans le cylindre est suffisante pour tenir le clapet ouvert; puis, dès que cette pression baisse, le clapet se referme, et l'eau admise dans le réservoir d'eau chaude ne peut en ressortir.

Le tube à souffler *u* est situé au-dessus du tube d'éduction, et il sert à la sortie des gaz contenus dans le cylindre, de la même manière que le tube d'éduction sert à celle de l'eau. Ce tube est fermé en u' par un clapet qui s'ouvre du dedans au dehors, et, en outre, il porte un peu plus loin un robinet u'' dont on peut changer l'ouverture à volonté. Comme la vapeur apporte toujours de l'air avec elle, et qu'il en pénètre d'ailleurs directement aussi dans le cylindre, il s'ensuit qu'après la condensation de la vapeur, pendant la course descendante, cet air subsiste sous le piston; mais, dès que le régulateur est ouvert, la vapeur venant de la chaudière s'élève au-dessus de l'air qui est plus lourd, et, exerçant sur lui sa pression, le force de sortir du cylindre par le tube *u*, en soulevant le clapet u'. Le robinet u'' sert à régler l'orifice du passage, de manière que, pendant l'ouverture du clapet u', ce passage suffise précisément à la sortie de l'air introduit dans le cylindre sans laisser, autant que possible, échapper de la vapeur. Le tuyau se continue ensuite jusqu'à l'extérieur de l'édifice, pour laisser sortir l'air au dehors.

Nous venons de voir que les deux tubes *e* et *u* sont toujours ouverts pour la sortie de l'eau et des gaz, dès que la vapeur exerce son action à cet effet; mais, quant aux tubes d'admission et d'injection A et I, il faut qu'ils soient successivement ouverts et fermés par un appareil spécial pour que la machine puisse exécuter son mouvement. C'est ce que nous allons expliquer maintenant.

Près du cylindre s'élèvent deux montans verticaux, ici projetés en un seul M, et qui servent à supporter un axe horizontal *o*, destiné à gouverner le régulateur *a*. Cet axe porte cinq leviers, qu'on distingue facilement sur la figure. Les deux premiers, *y* et y', servent à fermer et ouvrir le régulateur. A cet effet, ils comprennent entre eux un étrier a'' qui forme l'extrémité de la tige du régulateur, de sorte que, lorsque cet étrier est poussé vers le cylindre par la branche y', comme il est représenté sur la figure, le régulateur est ouvert; mais si, en faisant tourner l'axe *o*, on fait descendre le levier *y* jusqu'à ce qu'il vienne appuyer sur l'étrier, il poussera celui-ci en sens contraire, c'est-à-dire l'éloignera du cylindre et fermera le régulateur. Les deux leviers suivans, y'' et y''', servent à produire le mouvement de l'axe, et, par suite, celui des deux leviers *y* et y', selon qu'il convient à l'action de la machine. A cet effet, deux poutrelles, ici projetées en une seule TT, sont suspendues au grand balancier de la machine, et portent des taquets susceptibles de frapper en passant les leviers y'' et y''', à la manière ordinaire des encliquetages. Quand les poutrelles TT descendent, un taquet fixé à la face postérieure de la poutrelle la

plus éloignée presse sur le levier y'', et, par conséquent, pousse l'étrier dans la position de la figure, ce qui ouvre le régulateur. Quand, ensuite, les poutrelles TT remontent, un autre taquet, situé entre les deux poutrelles, rencontre le levier y''', le relève, et, par conséquent, en faisant tourner l'axe, amène le levier y contre l'étrier, ce qui tire celui-ci en arrière et ferme le régulateur. Le cinquième levier Y porte un contre-poids, qui sert à produire, par une action subite, les deux effets dont il vient d'être question, aussitôt que l'axe o a été tourné seulement d'une quantité suffisante pour que la branche Y dépasse, d'un côté ou de l'autre, la verticale du point o. En effet, dès ce moment, le contre-poids tombe, l'axe o achève subitement sa révolution, et les leviers y ou y', choquant vivement l'étrier a, placent d'un seul coup le régulateur dans la position qu'il doit occuper. Pour que le mouvement communiqué à l'étrier n'excède pas les limites nécessaires pour ouvrir le régulateur à la grandeur voulue, le contre-poids Y est retenu par une courroie d'arrêt fixée en o' qui limite sa chute des deux côtés de la verticale $o'o$.

Le robinet d'injection i est mis en mouvement par une disposition semblable. Un axe horizontal n, fixé à un montant vertical N, porte trois leviers. Celui du bas x est un levier à fourche qui saisit entre ses deux branches la poignée du robinet; de sorte que selon le mouvement donné à l'axe, c'est-à-dire selon que le levier x passe à gauche ou à droite de la verticale, le robinet i se trouve ouvert ou fermé. Le second levier x' est assez long pour arriver jusqu'à la poutrelle double TT, dont il rase la face antérieure, et celle-ci porte un taquet qui, lorsque la poutrelle descend, vient appuyer sur le levier x', le baisse, comme on le voit représenté sur la figure, et, par conséquent, ferme le robinet d'injection. Enfin, le troisième levier est à deux branches: l'une porte un contre-poids X, qui tend toujours à faire tourner l'axe dans le sens convenable pour ouvrir le robinet; l'autre est susceptible de s'engager dans un cliquet supérieur x'', et sert à retenir le contre-poids soulevé et le robinet fermé, jusqu'à ce que le cliquet soit dégagé. On voit par là que, quand la poutrelle TT descend, le taquet qu'elle porte, en appuyant sur le levier x', relève le contre-poids X, accroche le cliquet x'', et ferme le robinet i; mais que si, ensuite, on soulève le cliquet, le contre-poids X s'échappe, l'axe tourne, le levier x passe de droite à gauche de la verticale, et le robinet d'injection est ouvert à l'instant. Il est entendu que les taquets fixés aux poutrelles peuvent être changés de place à volonté.

Cela posé, le jeu de la machine sera compris facilement. Supposons la machine arrêtée, et le piston ramené au sommet du cylindre par la prépondérance du contre-poids ou de la maîtresse tige des pompes ZZ, comme il l'est toujours pendant les interruptions du travail, et supposons également le robinet d'injection fermé: si, alors, le machiniste veut mettre la machine en mouvement, il ouvre à la main le régulateur au moyen d'un manche fixé à l'extrémité du levier y', et la vapeur de la chaudière pénètre dans le cylindre; c'est la situation représentée sur la figure.

Cette vapeur, après avoir réchauffé suffisamment les parois du cylindre, le remplit complétement; elle fait sortir par le tube d'éduction *e* l'eau qui s'y est amassée, et expulse également par le tube *u* l'air qui s'était introduit dans le cylindre pendant l'interruption du travail. Quand la vapeur sort pure et sans mélange d'air par le tube *u*, le machiniste ferme le régulateur à la main; puis il soulève de même le cliquet x'', ce qui fait tomber le contre-poids X et ouvre le robinet d'injection. Alors, un jet d'eau froide s'élance dans le cylindre, la vapeur se condense, et le piston, pressé sur sa face supérieure par l'élasticité de l'atmosphère, tandis qu'il n'éprouve en dessous que la pression de la vapeur imparfaitement condensée, commence sa descente dans le cylindre, et les poutrelles TT descendent en même temps.

A partir de ce moment, le mouvement de la machine se continue sans l'intervention du machiniste. Quand le piston s'approche du bas de sa course, le taquet, fixé en avant des poutrelles TT, rencontre le long levier x'; il le baisse, et, dans cette action, il relève le contre-poids X, accroche le cliquet x'', et ferme le robinet d'injection. On remarquera que cette clôture du robinet d'injection peut avoir lieu avant la fin de la course du piston, parce que la coudure du levier x' permet à la poutrelle TT de passer et de continuer sa descente sans être arrêtée par le levier. Le piston poursuit donc encore son mouvement après la clôture du robinet, par l'effet de sa vitesse acquise; mais, si le robinet d'injection a été fermé en un point convenable de la descente du piston, la vapeur non condensée qui subsiste sous celui-ci se comprime de plus en plus et finit par le ramener promptement au repos. Un instant avant que le piston ne soit arrêté complétement, le taquet placé à la face postérieure des poutrelles TT rencontre le levier y'', qui avait été relevé par la clôture du régulateur. Il appuie sur ce levier, en relevant le contre-poids Y, qui avait été rejeté à droite de la poutrelle, et continue de relever graduellement le contre-poids, jusqu'à ce que celui-ci ait dépassé la verticale $o'o$. Alors, le contre-poids tombe de lui-même dans la position marquée sur la figure, le régulateur s'ouvre, et la vapeur de la chaudière, pénétrant dans le cylindre, finit d'arrêter le piston, si celui-ci conservait encore quelque vitesse.

A compter du moment que le régulateur est ouvert, la vapeur arrive avec rapidité dans le petit espace du cylindre situé sous le piston, et, après en avoir réchauffé les parois, ainsi que la face inférieure du piston, qui est garnie d'une semelle de bois pour produire le moins de condensation possible, elle commence à exercer dans le cylindre une pression supérieure à la pression atmosphérique. Alors l'eau de condensation amassée au fond du cylindre en est chassée par le tube d'éduction *e*, et l'air et les gaz qui subsistaient au-dessus de cette eau sont également expulsés par le tube *u*, qui laisse en même temps échapper une certaine portion de la vapeur elle-même, Mais bientôt le piston, pressé en dessous par une force supérieure à celle de l'atmosphère, et sollicité dans le même sens par le poids de

la maitresse tige des pompes ZZ, qui tend à retomber, commence sa course remontante. Son mouvement est rapide d'abord, à cause de l'excès de pression qui existe sous le piston, et, dans ce moment, l'eau et les gaz contenus au fond du cylindre continuent encore d'être expulsés par les tuyaux *e* et *u*; mais, après un instant, le mouvemement du piston devient uniforme, parce que la chaudière ne peut fournir. par l'orifice du régulateur, la vapeur à une pression supérieure à l'atmosphère aussi rapidement que le piston tend à s'élever dans le cylindre, entraîné par la prépondérance de la maitresse tige des pompes: alors, les deux clapets *e* et *u* se referment d'eux-mêmes, et le piston remonte aussi rapidement que la chaudière peut entretenir dans le cylindre une pression capable de donner la prépondérance au contre-poids sur la pression atmosphérique qui agit en sens contraire. La course remontante s'exécute donc, et les poutrelles TT remontent en même temps. Quand le piston est près d'arriver au sommet de sa course, le taquet intérieur des poutrelles rencontre le levier y''', le relève, rejette le contre-poids Y à droite de la verticale, ce qui ferme le régulateur; puis, un moment après, une chaîne x''', fixée à la poutrelle, soulève le cliquet x'' et dégage le contre-poids X, qui, en tombant, ouvre le robinet d'injection. Le vide se fait donc aussitôt dans le cylindre, ce qui rend la prépondérance à la pression atmosphérique au-dessus du piston. Ainsi, le piston s'arrête pour recommencer une course descendante, et ainsi de suite.

On doit donc observer que le moment représenté sur la figure est celui de la première mise en action de la machine, puisqu'il suppose que le piston est arrivé au sommet du cylindre, et que le régulateur n'est pas encore fermé, ni le robinet d'injection ouvert. Comme ces deux opérations s'exécutent, ainsi que nous venons de le dire, un peu avant que le piston n'atteigne le haut de sa course, on voit que, pendant l'action régulière de la machine, les contre-poids Y et X cessent d'avoir la position représentée ici, un moment avant que le piston ne soit parvenu au point où il se trouve sur la figure. Cette observation suffit pour qu'il n'y ait pas de malentendu.

Nous avons dit que l'eau de condensation s'écoule par le tuyau d'éduction *e* dans le réservoir d'eau chaude M. Elle passe ensuite, en partie, dans la chaudière, au moyen du tube d'alimentation *m*. Celui-ci est un tube vertical plongeant dans la chaudière, et portant vers son sommet un embranchement qui conduit au réservoir d'eau chaude. Comme ce réservoir est suffisamment élevé pour que le poids de la colonne d'eau formée du niveau du réservoir au niveau de l'eau de la chaudière, excède le surplus de pression de la vapeur dans la chaudière sur la pression atmosphérique, il s'ensuit que l'eau du réservoir d'eau chaude s'écoule dans la chaudière d'une manière continue, au moyen d'un robinet placé sur le tube d'embranchement, on en règle la quantité exactement sur les besoins de la machine.

L'eau froide nécessaire pour la condensation est fournie par la pompe P, qui

est une pompe élévatoire ordinaire mise en jeu par le grand balancier de la machine. La tige *p* de cette pompe, ainsi que la maîtresse tige des pompes d'épuisement ZZ, et le piston lui-même, sont attachés au balancier par des chaînes qui s'enroulent sur des arcs destinés à maintenir ces pièces dans la direction verticale qui convient à leur action. Comme les pompes d'épuisement sont élévatoires, ce qui fait qu'elles sont mises en action pendant la montée de la maîtresse tige, ou la descente du piston dans le cylindre, et que, d'autre part, quand le piston remonte, il exécute ce mouvement seulement avec l'aide de la pression inférieure de la vapeur, mais en réalité par la prépondérance alors accordée à la maîtresse tige des pompes, il en résulte que les chaînes dont il est question sont toujours tendues, et qu'ainsi il n'y a aucun besoin d'employer des tiges rigides.

Enfin, pour que le piston ne soit pas exposé à frapper le fond du cylindre, ou à en sortir par le haut, le grand balancier porte deux traverses *k*, *k*, destinées à venir frapper des poutrelles élastiques k', k', si ce cas se présentait; mais, quand la machine est bien conduite, ces chocs doivent avoir lieu très-rarement, et le piston doit s'arrêter de lui-même sans choc et à la fin de chacune de ses courses, comme nous le dirons dans un instant.

Dans la machine que nous venons de décrire, la condensation de la vapeur s'exécute dans le cylindre même, et c'est ainsi que la plupart des machines atmosphériques ont été construites. Néanmoins, on y emploie aussi quelquefois un condenseur séparé, à l'exemple des machines de Watt, ce qui fait éviter la perte de vapeur qui a lieu à chaque coup de piston par suite du refroidissement et du réchauffement successifs du cylindre; mais, comme l'addition de cet appareil se conçoit facilement, nous croyons suffisant de mentionner ce fait, sans entrer dans d'autres détails à cet égard. Du reste, les machines atmosphériques ont cessé à peu près entièrement d'être en usage, et, pour en avoir une figure, nous avons été obligé de recourir à l'ouvrage de Smeaton, le dernier constructeur célèbre des machines de ce système.

ARTICLE II.

THÉORIE DE LA MACHINE ATMOSPHÉRIQUE.

§ I. *Du règlement de la machine.*

D'après ce que nous venons de dire, dans les machines atmosphériques la force motrice est successivement : la pression de la vapeur aidée du contre-poids d'abord, et la pression atmosphérique ensuite; et l'effet utile, au lieu de se produire pendant la première de ces deux périodes, c'est-à-dire dans le moment de l'application de la vapeur, se produit, au contraire, pendant l'action de la pression atmosphérique. Ces deux forces agissent, par conséquent, tour à tour; cependant,

comme la pression atmosphérique n'est ici qu'une force inerte, incapable de produire aucun effet, à moins qu'elle n'en soit d'abord mise en mesure par la production et l'application de la vapeur, il s'ensuit qu'après tout, c'est toujours la vapeur qui est la vraie force motrice du mouvement.

Le mode d'opération de cette machine peut facilement se ramener à celui d'une machine de Watt à simple action; car, puisque la pression atmosphérique équivaut à un poids de 14.71 livres par pouce carré, on peut supposer qu'on place sur la partie supérieure du piston des poids réels de 14.71 livres par chaque pouce carré de sa surface, et ces poids produiront le même effet que la pression atmosphérique. On pourra donc alors supprimer l'action de l'atmosphère, considérer que les choses se passent dans le vide, et rien ne sera changé au système. De cette manière, la machine se réduira à un poids matériel placé sur le piston, d'une part, et, de l'autre, à la pression de la vapeur introduite et supprimée tour-à-tour sous le piston, pour le soulever d'abord avec le secours d'un contre-poids, et le laisser redescendre ensuite par l'effet du poids qui a remplacé la pression de l'atmosphère. On retombera donc alors exactement dans le cas d'une machine de Watt à simple action, dans laquelle l'effet utile, au lieu de se produire immédiatement pendant l'application de la vapeur, se produirait pendant le retour du piston; et, par conséquent, dans ces machines, la vapeur joue le même rôle que dans les machines de Watt à simple action.

Les machines atmosphériques n'ayant point, en général, de volant ni de manivelle, c'est-à-dire n'étant pas rotatives, nécessitent, comme les machines de Watt à simple action, un règlement particulier, afin que le piston s'arrête de lui-même dans le cylindre, après avoir parcouru la course entière qui lui est assignée, sans la dépasser, ni s'arrêter auparavant. Pour obtenir cet effet, un instant avant que le piston n'atteigne le haut du cylindre dans sa course montante, on supprime l'arrivée de la vapeur de la chaudière; alors, pendant l'espace qui lui reste encore à parcourir, le piston ne se meut plus qu'en vertu de sa vitesse acquise, de l'effort du contre-poids et de la pression décroissante de la vapeur pendant sa détente sous le piston. Dès que la communication de la chaudière est interrompue, la résistance de l'atmosphère sur le dessus du piston devient donc, en peu de temps, supérieure à la force motrice; et, par conséquent, le piston se trouve arrêté sans choc et par degrés insensibles.

Dans la course descendante, au contraire, on suspend la condensation de la vapeur un peu avant la fin de la course, soit en arrêtant l'eau d'injection, quand la condensation se fait dans le cylindre même, soit en fermant à temps la communication du cylindre au condenseur, quand la machine est munie d'un condenseur séparé. La vapeur, qui se trouve ainsi enfermée sous le piston sans être condensée, lui oppose donc, en se comprimant, une résistance de plus en plus grande, et finit par le ramener doucement au repos. Mais, on doit remarquer que, comme

cette vapeur recueille ainsi tout le travail développé par le piston en revenant au repos, et qu'elle doit contribuer elle-même à la course suivante du piston, il ne se fait encore aucune perte d'action. Quelquefois aussi, on ouvre le régulateur un peu avant que le piston n'atteigne le fond du cylindre, et la vapeur de la chaudière présente alors un obstacle qui arrête promptement le piston, ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer plus haut.

Au moyen de ces dispositions, qui ont pour but pratique de préserver le fond du cylindre des chocs du piston, la machine atmosphérique se trouve, comme celle de Watt à simple action, régularisée dans sa vitesse et ramenée chaque fois au repos sans perte de force vive. Par conséquent, en se reportant à ce que nous avons dit relativement à ce point, en traitant des machines de Watt à simple action, on reconnaîtra que les formules propres au calcul des machines atmosphériques peuvent encore être établies sur les mêmes principes que précédemment, savoir : l'égalité entre le travail développé par la puissance et celui exécuté par la résistance dans les deux courses du piston, et l'égalité entre la dépense de vapeur par le cylindre et la vaporisation utile de la chaudière.

§ II. *Des effets de la machine avec un contre-poids, une clôture du robinet d'injection et une charge ou une vitesse quelconques.*

On doit distinguer quatre cas dans le travail des machines atmosphériques : celui où elles fonctionnent avec un contre-poids. une clôture du robinet d'injection et une charge ou une vitesse *quelconques ;* celui où elles fonctionnent avec un contre-poids et une clôture du robinet d'injection arbitraires, mais avec la charge ou la vitesse qui produisent le *maximum d'effet utile pour ce contre-poids et cette clôture du robinet d'injection* ; celui où elles travaillent avec un contre-poids arbitraire, mais avec la clôture du robinet d'injection et la charge le plus favorables *pour ce contre-poids ;* et enfin, celui où le contre-poids, ayant d'abord été réglé à son degré le plus avantageux pour le travail de la machine, on donne, en outre, à celle-ci, la clôture du robinet d'injection et la charge le plus avantageuses pour ce contre-poids, ce qui produit, par conséquent, le *maximum absolu d'effet utile* dont est capable la machine.

Nous supposerons d'abord le premier cas, et nous appellerons, comme précédemment,

P la pression absolue de la vapeur dans la chaudière ;

P' sa pression inconnue moyenne pendant son admission dans le cylindre ;

a l'aire du cylindre ;

l la course totale du piston ;

l' la portion parcourue dans la course montante, avant qu'on intercepte l'arrivée de la vapeur dans le cylindre ;

l'' la portion parcourue dans la course descendante, avant qu'on ferme le robinet d'injection ou la communication du cylindre au condenseur ;

c la liberté du cylindre, représentée par une longueur équivalente de la course du piston ;

ρ' la charge utile du piston, dans la course montante, répartie par unité de la surface du piston, et ρ'' sa charge utile, dans sa course descendante, répartie de même; la première de ces deux charges, quand elle existe, étant produite par l'action d'une pompe foulante, et la seconde par l'action d'une pompe élévatoire, mises en jeu chacune dans leur course respective ;

r l'ensemble des deux charges précédentes, ou la charge de l'effet utile, de sorte que ρ' étant donné à priori, et r étant fourni par le calcul, on a $\rho'' = r - \rho'$;

Π le poids du contre-poids supposé réparti par unité de la surface du piston ;

f' le frottement de la machine, alors non chargée, pendant la course montante du piston ;

f'' le frottement de la machine fonctionnant sans charge, pendant la course descendante du piston ;

δ le surplus que subit ce frottement, par unité d'un poids quelconque supporté par le piston ;

φ la pression atmosphérique ;

p la pression moyenne, subsistant sous le piston, en raison de la condensation imparfaite de la vapeur ;

m et n les constantes du volume spécifique de la vapeur.

Enfin, nous comprendrons, dans la valeur des frottemens f' et f'', le travail absorbé à la fin de chaque course, soit par le choc du balancier contre les gardes du mouvement quand ce choc a lieu, soit par l'ouverture prématurée du robinet d'injection avant la terminaison complète de la course montante, ou du régulateur avant la terminaison de la course descendante, dispositions qui créent nécessairement une perte de force, puisqu'elles empêchent de profiter entièrement de la détente de la vapeur dans la course montante, ou de la force d'inertie des masses en mouvement dans la course descendante. De même, le contre-poids est supposé calculé, en tenant compte du poids des tiges qui trempent dans l'eau des pompes.

Cela posé, pendant la course montante du piston, la vapeur agit dans le cylindre, comme pendant la course descendante des machines de Watt à simple action. Ainsi, le travail développé par sa pression originale, durant son arrivée directe de la chaudière, et ensuite par sa pression décroissante, durant la détente, a encore pour expression, chap. XI, art. II, § III,

$$a\,(l'+c)\,(n+\mathrm{P}')\left(\frac{l'}{l'+c}+\log\frac{l+c}{l'+c}\right)-nal.$$

D'un autre côté, pendant la même course, le travail développé par le contre-poids, en descendant de la hauteur l, est Πal; celui qui est exécuté par la pompe foulante est $\rho' al$; celui qui résulte du frottement de la machine, alors non chargée, est $f'al$; et, enfin, celui qui est exécuté par la pression atmosphérique est φal. Par

conséquent, l'égalité entre la quantité de travail développée par la puissance et par la résistance fournira l'équation

$$a(l'+c)(n+P')\left(\frac{l'}{l'+c}+\log\frac{l+c}{l'+c}\right)-nal+\Pi al=\varphi al+\rho' al+f' al.$$

Et, en faisant pour simplifier,

$$k'=\frac{l'}{l'+c}+\log\frac{l+c}{l'+c},$$

on pourra écrire l'équation précédente sous la forme

$$n+P'=\frac{l}{l'+c}\cdot\frac{1}{k'}(n+\varphi+\rho'+f'-\Pi). \qquad \text{(A)}$$

Ce sera donc la première des trois relations générales cherchées.

Pour passer maintenant à la course descendante du piston, la quantité de travail appliquée par la pression atmosphérique, qui est alors la force motrice, a pour valeur φal. D'autre part, la quantité d'action développée par le contre-poids est Πal ; celle de la charge est $\rho'' al$; celle du frottement de la machine, qui supporte alors la charge et le contre-poids, est

$$(f''+\delta\rho''+\delta\Pi)\,al.$$

Quant à celle qui est développée par la pression p, subsistant sous le piston en raison de la condensation imparfaite de la vapeur, on doit la décomposer en deux parties. La pression p s'exerce d'abord sans effet additionnel, pendant que le piston parcourt la longueur l'' de sa course, c'est-à-dire jusqu'à ce que l'on ferme la communication du condenseur, ou que l'on suspende la condensation de la vapeur, si la machine n'a pas de condenseur. Cette pression produit donc, dans ce premier intervalle, une quantité d'action exprimée par

$$pal''.$$

Mais, à partir de ce point, la condensation cesse ; la vapeur qui subsiste encore sous le piston commence à être comprimée de plus en plus, et cet effet s'exerce sur la longueur $(l-l'')$, que le piston doit encore parcourir pour terminer sa course. Il reste donc à déterminer la quantité d'action que développe la vapeur pendant cette compression.

Or, au moment où cette vapeur commence à être comprimée, elle est à la pression p, et le volume qu'elle occupe au-dessous du piston est

$$a(l-l''+c).$$

Si donc, on appelle ω la pression, mesurée par unité de surface, qu'elle aura lorsque le piston aura parcouru la longueur λ de sa course, et qu'on suppose que le piston parcoure, en outre, un espace élémentaire $d\lambda$, le travail élémentaire correspondant produit par la compression de la vapeur sera

$$a\omega d\lambda.$$

Mais, comme c'est la même vapeur qui, après avoir occupé, en présence du liquide de condensation et sous la pression p, l'espace

$$a(l-l''+c),$$

occupe maintenant sous la pression ω l'espace

$$a(l-\lambda+c),$$

sans qu'on lui ait enlevé, dans cet intervalle, aucune portion de sa chaleur totale, il existe entre les volumes et les pressions correspondantes de la vapeur, la relation (c) que nous avons démontrée généralement, chap. II, art. I, § VI, savoir :

$$\omega=(n+p)\frac{a(l-l''+c)}{a(l-\lambda+c)}-n.$$

Par conséquent, on en conclut

$$\omega a d\lambda=a(n+p)(l-l''+c)\frac{d\lambda}{(l-\lambda+c)}-nad\lambda.$$

Ainsi, en procédant comme précédemment, c'est-à-dire en prenant l'intégrale de cette expression entre les limites l'' et l, on aura pour la quantité d'action développée par la compression graduelle de la vapeur sur la longueur $(l-l'')$ de la course, l'expression suivante :

$$a(n+p)(l-l''+c)\log\frac{l-l''+c}{c}-na(l-l''),$$

où le terme

$$\log\frac{l-l''+c}{c}$$

exprime un logarithme hyperbolique.

En y ajoutant le travail pal'', produit pendant la portion de course antérieure à la compression de la vapeur, on aura, pour la quantité totale d'action développée par la résistance de la vapeur non condensée,

$$al(n+p)\left(\frac{l''}{l}+\frac{l-l''+c}{l}\log\frac{l-l''+c}{c}\right)-nal.$$

Si l'on fait, pour abréger,

$$k''' = \frac{l''}{l - l'' + c} + \log \frac{l - l'' + c}{c},$$

l'expression précédente pourra s'écrire sous la forme

$$(n + p) \frac{l - l'' + c}{l} k''' al - nal.$$

Par conséquent, en se reportant à ce que nous avons trouvé pour la quantité d'action développée par la pression atmosphérique, la charge, le contre-poids et le frottement de la machine, nous exprimerons l'égalité entre le travail appliqué par la puissance et le travail exécuté par la résistance, dans la course que nous considérons, par l'équation suivante :

$$\varphi al = \rho'' al + \Pi al + (f'' + \delta \rho'' + \delta \Pi)\, al + \frac{l - l'' + c}{l}(n + p)\, k''' al - nal,$$

qui donne

$$(1 + \delta)\, \Pi = n + \varphi - (1 + \delta)\, \rho'' - f'' - \frac{l - l'' + c}{l}(n + p)\, k'''. \qquad \text{(B)}$$

C'est, par conséquent, la seconde relation entre les données et les inconnues du problème.

Enfin, la troisième relation cherchée s'obtiendra en exprimant l'égalité entre la production et la dépense de vapeur.

S étant toujours le volume d'eau vaporisé par minute dans la chaudière, et effectivement transmis au cylindre, ce volume d'eau, une fois transformé en vapeur à la pression P' du cylindre, deviendra, comme on l'a vu,

$$\frac{mS}{n + P'}.$$

D'un autre côté, la capacité du cylindre qui se remplit de vapeur à chaque course montante du piston est exprimée par

$$a\,(l'' + c).$$

Mais nous avons vu qu'à chaque course descendante, une certaine quantité de vapeur reste comprimée sous le piston, et se trouve employée à la course suivante, c'est-à-dire restituée à la chaudière, au lieu d'être condensée. La pression de cette vapeur, au moment qu'on en fait la séparation dans le cylindre, est p, et le volume qu'elle occupe sous cette pression est

$$a\,(l - l'' + c).$$

Si elle repassait à la pression P', sans perdre de sa chaleur totale, son volume changerait dans le rapport

$$\frac{n+p}{n+P'},$$

c'est-à-dire qu'il deviendrait

$$a(l-l''+c)\frac{n+p}{n+P'}.$$

Cette expression donne donc le volume de vapeur, mesuré à la pression d'admission dans le cylindre, qui est restitué à chaque course descendante. Ainsi, la dépense réelle de vapeur par double coup de piston n'est que

$$a(l'+c)-a(l-l''+c)\frac{n+p}{n+P'}.$$

Par conséquent, en représentant par M le nombre des doubles coups de piston que donne la machine par minute, la dépense de vapeur par minute sera

$$M\left[a(l'+c)-a(l-l''+c)\frac{n+p}{n+P'}\right].$$

Mais, si l'on appelle V la vitesse moyenne du piston, ou l'espace qu'il parcourt par minute, tant en montant qu'en descendant, on aura $V=2Ml$; ou bien, si l'on ne compte pour la vitesse que l'espace parcouru par le piston en produisant l'effet utile, c'est-à-dire en descendant seulement, et qu'on appelle v cette vitesse ainsi mesurée, on aura

$$v=Ml, \quad \text{ou} \quad M=\frac{v}{l}.$$

Ainsi, le volume de vapeur dépensé par le cylindre dans une minute sera

$$\frac{v}{l}a\left[l'+c-(l-l''+c)\frac{n+p}{n+P'}\right].$$

L'équation qui exprime l'égalité entre la production et la dépense de la vapeur sera donc

$$\frac{v}{l}a\left[l'+c-(l-l''+c)\frac{n+p}{n+P'}\right]=\frac{mS}{n+P'},$$

qui donne

$$n+P'=\frac{mS}{av}\cdot\frac{l}{l'+c}+\frac{l-l''+c}{l}\cdot\frac{l}{l'+c}(n+p). \qquad (C)$$

C'est la troisième relation générale cherchée.

Par conséquent, éliminant la quantité inconnue P' entre les équations (A) et (C), on trouve d'abord

$$\frac{1}{k'}(f'+n+\varphi+\rho'-\Pi)=\frac{mS}{av}+\frac{l-l''+c}{l}(n+p); \quad \text{(D)}$$

puis, éliminant le contre-poids Π entre cette dernière équation et l'équation (B), résolvant la résultante par rapport aux diverses indéterminées du problème, et mettant pour $(\rho'+\rho'')$ sa valeur r, on obtient les formules suivantes :

$$v=m\frac{S}{a}\cdot\frac{(1+\delta)k'}{(1+\delta)(r+f')+f''+\delta(n+\varphi)+\frac{l-l''+c}{l}(n+p)[k'''-(1+\delta)k']}, \quad (1)$$

$$ar=m\frac{S}{v}k'-a\frac{l-l''+c}{l}\left(\frac{k'''}{1+\delta}-k'\right)(n+p)$$
$$-\frac{a}{1+\delta}[(1+\delta)f'+f''+\delta(n+\varphi)], \quad (2)$$

$$S=\frac{av}{m}\cdot\frac{(1+\delta)(r+f')+f''+\delta(n+\varphi)+\frac{l-l''+c}{l}(n+p)[k'''-(1+\delta)k']}{(1+\delta)k'}, \quad (3)$$

$$\text{E.u.}=arv. \quad (4)$$

Les quantités k' et k''' contenues dans ces équations représentent les expressions suivantes :

$$k'=\frac{l'}{l'+c}+\log\frac{l+c}{l'+c},$$

$$k'''=\frac{l''}{l-l''+c}+\log\frac{l-l''+c}{c};$$

et l'on en trouvera les valeurs toutes calculées dans une Table que nous donnerons un peu plus loin. Si l'on n'a pas cette Table sous les yeux, on se souviendra que les logarithmes de ces expressions sont des logarithmes hyperboliques, qu'on obtient en multipliant les logarithmes ordinaires des Tables par le nombre 2.302585.

Ces formules donnent la solution des problèmes qui peuvent se présenter, car toutes les quantités qui figurent dans le second membre sont connues par la nature même des questions proposées. Il faut cependant en excepter la quantité $\frac{l''}{l}$, qui n'est pas ordinairement une des données originales du problème, mais qui résulte du contre-poids, lequel est seul donné a priori. Il faut donc avoir un moyen de déterminer immédiatement cette quantité en fonction des données réelles du pro-

blème. Pour cela, il suffit de recourir aux équations générales (B), (D), qui donnent

$$\frac{l-l''+c}{l}k''' = \frac{n+\varphi-(1+\delta)(r-\rho'+\Pi)-f''}{n+p}, \qquad (E)$$

$$\frac{l''}{l} = \frac{l+c}{l} - \frac{n+\varphi+\rho'+f'-\Pi-\frac{mS}{av}k'}{(n+p)k'}. \qquad (E')$$

On pourra donc, au moyen de l'une ou de l'autre de ces équations, connaître immédiatement la quantité $\frac{l''}{l}$, et, par conséquent, la substituer dans les formules précédentes, comme si elle était une donnée primitive du problème. Pour le cas du maximum d'effet utile, où l'on ne connait à priori ni la charge ni la vitesse de la machine, la valeur de $\frac{l''}{l}$ sera déterminée directement, comme on le verra dans un instant.

Pour résoudre numériquement la première des deux équations (E), (E') qu'on vient de présenter, il faudra procéder, comme il a été indiqué relativement aux machines de Watt à simple action, c'est-à-dire qu'il faudra faire une supposition sur l'', en conclure k''' au moyen de la Table n°. IV, qu'on donnera un peu plus loin, puis effectuer le produit

$$\frac{l-l''+c}{l}k'''.$$

Si ce produit est plus grand ou plus petit que la valeur du second membre de l'équation, on fera une supposition un peu différente sur $\frac{l''}{l}$, et on continuera ainsi à faire varier $\frac{l''}{l}$ dans le sens qui rapprochera les résultats, jusqu'à ce qu'on parvienne à la solution cherchée. Il est nécessaire d'ajouter que ce calcul est extrêmement facile et n'exige que trois ou quatre essais.

§ III. *De la charge ou de la vitesse qui produisent le maximum d'effet utile pour une clôture du robinet d'injection et une détente ou un contre-poids fixés.*

D'après les formules qu'on vient d'obtenir, on voit que, pour chaque charge donnée à la machine, sans rien changer aux quantités $\frac{l'}{l}$ et $\frac{l''}{l}$, il se produit une certaine vitesse, et, par conséquent, un certain effet utile correspondant. La question est donc maintenant de reconnaître, parmi toutes les charges ou les vitesses qu'on peut supposer à la machine, celle qui rendra son effet utile un maximum

pour des valeurs données de $\frac{l''}{l}$ et $\frac{l'}{l}$, c'est-à-dire pour une clôture du robinet d'injection et une détente fixées.

Pour cela, il faut d'abord former l'expression de l'effet utile avec une charge ou une vitesse quelconques. Or, en multipliant les deux termes de l'équation (2) par v, on obtient

$$arv = mk'S - \frac{av}{1+\delta}[(1+\delta)f' + f'' + \delta(n+\varphi)]$$
$$- av\,\frac{l - l'' + c}{l}(n+p)\left(\frac{k'''}{1+\delta} - k'\right);$$

c'est donc la valeur de l'effet utile cherché. Mais, en observant cette expression, on reconnaît que la variable v n'entre que dans des termes négatifs, puisque $\frac{k'''}{1+\delta}$ est toujours plus grand que k', comme il est facile de s'en assurer en jetant un coup d'œil sur la Table des valeurs de ces quantités. Donc, le maximum d'effet utile sera donné par la plus petite valeur de v. D'autre part, en se rapportant à l'équation générale (C), qui donne

$$v = \frac{S}{a}\cdot\frac{m}{\frac{l'+c}{l}(n+P') - \frac{l-l''+c}{l}(n+p)},$$

on voit que la plus petite valeur possible de v sera donnée par la plus grande valeur de P', qui est $P' = P$. Donc, en introduisant cette condition dans la valeur de v, qu'on vient d'obtenir, on aura la vitesse qui produit le maximum d'effet utile de la machine, savoir :

$$v' = \frac{S}{a}\cdot\frac{m}{\frac{l'+c}{l}(n+P) - \frac{l-l''+c}{l}(n+p)}. \qquad (5)$$

Puis, en substituant cette valeur dans l'expression générale de r donnée par l'équation (2), on obtiendra, pour la charge correspondante de la machine, ou pour la charge qui produit le maximum d'effet utile,

$$ar' = a\,\frac{l'+c}{l}k'(n+P) - \frac{a}{1+\delta}\cdot\frac{l-l''+c}{l}k'''(n+p)$$
$$- \frac{a}{1+\delta}[(1+\delta)f' + f'' + \delta(n+\varphi)]. \qquad (6)$$

Ainsi, ces deux équations feront connaître la charge et la vitesse qui, pour une clôture donnée du robinet d'injection ou de la soupape d'éduction, et une détente

donnée de la vapeur, c'est-à-dire pour des valeurs fixées de $\frac{l''}{l}$ et de $\frac{l'}{l}$, feront produire à la machine son maximum d'effet utile.

Il faut ajouter, relativement à ce problème que, quand le contre-poids de la machine est fixé à priori, avec la condition du maximum d'effet, c'est-à-dire quand on cherche le maximum d'effet utile que peut produire la machine *avec un contre-poids donné*, la détente $\frac{l'}{l}$ se trouve déterminée en même temps. En effet, en introduisant dans l'équation (A) la condition $P' = P$, on obtient

$$\frac{l'+c}{l}k' = \frac{n+\varphi+\rho'+f'-\text{n}}{n+\text{P}};$$

et cette relation fixe invariablement la valeur de $\frac{l'}{l}$, puisque tout est constant et connu dans le second membre. Ainsi, dans ce cas, la charge la plus avantageuse pour le contre-poids donné est indiquée par l'équation (6), dans laquelle $\frac{l'}{l}$ a nécessairement la valeur tirée de l'équation (A); et cette quantité $\frac{l'}{l}$ ne peut plus être déterminée par aucune autre condition.

Mais, il y a un cas plus général, c'est celui où, au lieu de fixer d'avance le contre-poids à employer, on se réserve, au contraire, de le déterminer d'après la condition que l'effet utile de la machine devienne le plus grand possible : alors, on doit chercher directement la valeur de $\frac{l'}{l}$ qui remplit la condition voulue, et l'équation (A) ne sert plus qu'à en déduire la valeur du contre-poids. C'est ce que l'on reconnaitra bientôt quand nous traiterons cette question.

§ IV. *Détermination du frottement de la machine non chargée, et de son frottement additionnel par unité de la charge supportée par le piston.*

Dans les machines atmosphériques, aussi bien que dans toutes les machines déjà traitées, la recherche qui précède fournit le moyen de déterminer le frottement propre de la machine, et son frottement additionnel par unité de la charge que supporte le piston.

En effet, si l'on fait travailler la machine sans aucune charge, mais, en baissant la pression de la vapeur dans la chaudière jusqu'à ce que tout ce que peut faire la machine soit de pousser le piston jusqu'au bout de sa course, en surmontant son frottement seulement, et qu'on ait soin de refermer la soupape d'éduction, ou le robinet d'injection, assez à temps pour empêcher tout choc du balancier à la fin de la course descendante, il est clair que le frottement de la machine sera devenu une charge maximum pour la pression dans la chaudière. En appelant

donc P'' la pression alors observée dans la chaudière, au moyen du manomètre, les équations générales (A) et (B) auront lieu, en y faisant à la fois $P' = P''$ et $\rho' = 0$, $\rho'' = 0$. Ainsi, on aura

$$f' = \Pi - n - \varphi + \frac{l' + c}{l} k' (n + P''),$$

$$f'' = n + \varphi - \Pi - \frac{l - l'' + c}{l} (n + p) k''' - \delta\Pi.$$

Donc, en mesurant en même temps sur la machine les quantités l' et l'', c'est-à-dire les points où il a fallu fermer les soupapes d'admission et d'éduction pour faire travailler la machine sans choc, prenant par observation la pression p de condensation dans le cylindre et négligeant le terme $\delta\Pi$, on aura toutes les quantités contenues dans le second membre des équations, et, par conséquent, elles feront connaître f' et f''.

Pour avoir la valeur de la quantité δ, on procédera d'une manière semblable. On fera travailler la machine avec une charge quelconque, mais connue, ρ'', en ayant soin de ne laisser produire aucun choc à la fin de la course descendante; on mesurera en même temps la pression p de condensation dans le cylindre, et alors l'équation (B) se trouvant satisfaite, on aura, pour déterminer δ, la formule

$$1 + \delta = \frac{n + \varphi - f'' - \frac{l - l'' + c}{l} (n + p) k'''}{\Pi + \rho''}$$

Par conséquent, cette équation fera connaître δ, puisque la quantité f'' est supposée connue par la recherche précédente, et que ρ'' est donnée. Comme cependant la valeur de f'' n'a été trouvée plus haut qu'en négligeant δ, il est clair qu'on pourra, si on le juge nécessaire, profiter de la valeur de δ qu'on vient d'obtenir, pour refaire le calcul précédent et arriver à une évaluation plus approchée de la quantité f''.

On peut encore déterminer les deux frottemens f' et f'', sans changer la charge habituelle de la machine, en se conformant seulement à la condition de faire travailler le piston sans choc, et de baisser la pression dans la chaudière jusqu'à ce que la charge de la machine devienne une charge maximum pour sa pression. En effet, en appelant P_1 la pression observée dans la chaudière, l'équation générale (A) donnera

$$f' = \Pi - (n + \varphi + \rho') + \frac{l' + c}{l} k' (n + P_1).$$

Comme on connait la charge ρ' de la course montante, cette équation donnera la valeur de f', et, ensuite, en tenant compte de la charge des pompes de service mises

en jeu dans une course et dans l'autre, on pourra en déduire celle de f'', ainsi que nous en avons donné un exemple pour les machines de Watt et de Cornwall à simple action.

§ V. *De la clôture du robinet d'injection la plus avantageuse pour une détente ou un contre-poids donnés.*

D'après les formules que nous avons obtenues dans l'avant-dernier paragraphe, il est clair que la charge et la vitesse de la machine, et, par suite, son effet utile, varient à mesure qu'on fait varier les quantités $\frac{l''}{l}$ et $\frac{l'}{l}$, c'est-à-dire à mesure qu'on change la clôture du robinet d'injection et la détente de la vapeur. Il y a donc deux questions que l'on doit se proposer maintenant, et que nous allons traiter successivement : c'est de chercher comment on pourrait disposer de ces quantités pour accroitre, autant que possible, l'effet utile de la machine.

Pour reconnaitre d'abord quelle est la clôture du robinet d'injection ou de la soupape du condenseur, qui est la plus favorable pour une détente donnée, il faut former l'expression de l'effet utile de la machine travaillant avec une clôture quelconque du robinet d'injection et avec la charge la plus favorable pour cette clôture, selon qu'il a été indiqué par la recherche précédente; puis, chercher la valeur de $\frac{l''}{l}$ capable de donner à cette expression sa plus grande valeur possible.

L'effet utile de la machine, avec une clôture quelconque du robinet d'injection et la charge la plus favorable pour cette clôture, s'obtient évidemment en multipliant l'une par l'autre les deux équations (5) et (6), et a pour valeur

$$ar'v' = m\mathrm{S}\,\frac{\frac{l'+c}{l}k' - \frac{l-l''+c}{l}\cdot\frac{k'''}{1+\delta}\cdot\frac{n+p}{n+\mathrm{P}} - \frac{(1+\delta)f'+f''+\delta(n+\varphi)}{(1+\delta)(n+\mathrm{P})}}{\frac{l'+c}{l} - \frac{l-l''+c}{l}\cdot\frac{n+p}{n+\mathrm{P}}}.$$

La question est donc de trouver quelle est la valeur de $\frac{l''}{l}$ qui rendra cette expression un maximum. Or, en y remplaçant k''' par sa valeur, savoir :

$$k''' = \frac{l''}{l-l''+c} + \log\frac{l-l''+c}{c},$$

puis, prenant la différentielle du résultat par rapport à l'' considérée comme variable, et égalant à zéro le coefficient différentiel, on obtient

$$\frac{l}{l'+c}\cdot\frac{n+p}{n+\mathrm{P}}\cdot\frac{l''}{l} + \log\frac{l-l''+c}{c}$$
$$= (1+\delta)k' - \frac{l}{l'+c}\cdot\frac{(1+\delta)f'+f''+\delta(n+\varphi)}{n+\mathrm{P}}. \qquad (7)$$

Cette équation fera connaître, par conséquent, la valeur de $\frac{l''}{l}$, qui satisfait à la condition desirée. Pour la résoudre numériquement, il faudra y substituer pour k' et pour les constantes leur valeur connue ; par cette première opération, le second membre, ainsi que le coefficent de $\frac{l''}{l}$ dans le premier membre, se trouveront remplacés par deux nombres, et l'équation se réduira à la forme très-simple

$$\mathrm{A}\frac{l''}{l} + \log\frac{l - l'' + c}{c} = \mathrm{B}.$$

Alors, pour en déduire la valeur cherchée de $\frac{l''}{l}$, il faudra procéder par tâtonnemens, c'est-à-dire essayer diverses valeurs de $\frac{l''}{l}$ jusqu'à ce qu'on trouve celle qui rend le premier membre de l'équation égal au second ; mais, on ne doit pas croire que cette recherche offre la moindre difficulté, car il suffit toujours de trois ou quatre essais très-faciles pour parvenir à la solution cherchée. Nous avons, du reste, déjà dit ailleurs que le logarithme exprimé dans cette formule est un logarithme hyperbolique dont on trouve une Table dans les *Tables de logarithmes de Callet,* et dont, au besoin, on aurait également la valeur en multipliant le logarithme ordinaire correspondant par le nombre 2.302585, ou, approximativement, par le nombre 2.303.

La valeur de $\frac{l''}{l}$, déduite de l'équation précédente, fera connaître le point de la course où il faut fermer le robinet d'injection ou la soupape d'éduction, pour que la machine produise le plus grand effet utile dont elle est capable avec la valeur donnée de $\frac{l'}{l}$; et comme, de plus, nous verrons bientôt que, quand cette quantité $\frac{l'}{l}$ est fixée pour la production du maximum d'effet utile, le contre-poids de la machine l'est également, et, *vice versâ*, il s'ensuit que la valeur de $\frac{l''}{l}$, déterminée par la recherche précédente, sera en même temps la clôture du robinet d'injection la plus avantageuse pour un contre-poids fixé.

§ VI. *De la détente ou du contre-poids qui produisent le maximum absolu d'effet utile.*

Les divers problèmes que nous avons résolus jusqu'ici l'ont été en supposant qu'on interrompt l'arrivée de la vapeur dans le cylindre, après une certaine portion de la course exprimée par $\frac{l'}{l}$ et que nous avons supposée fixée d'une manière

quelconque à priori. Mais, il est clair qu'à mesure qu'on donnera à cette quantité différentes valeurs, il s'ensuivra, pour la charge et la vitesse du piston, des valeurs différentes, et, par conséquent, aussi des valeurs différentes pour l'effet utile de la machine. On peut donc se proposer maintenant de reconnaître, parmi toutes les valeurs qu'il est possible de donner à $\frac{l'}{l}$, et chacune d'elles étant supposée accompagnée de la clôture du robinet d'injection et de la charge le plus favorables, quelle est celle qui rendra l'effet utile de la machine un maximum; et comme cette condition fixera la dernière des variables du problème, il est clair qu'elle déterminera le maximum *absolu* d'effet utile dont est capable la machine.

Pour résoudre cette question d'une manière directe, il faudrait d'abord, dans la valeur de $ar'v'$ donnée dans le paragraphe précédent, remplacer l'' et k''' par leur valeur en fonction de l', d'après l'équation (7); et alors, en différentiant le résultat par rapport à l' considérée comme variable, on pourrait arriver à la solution cherchée. Mais, comme la forme de l'équation (7) ne permet pas qu'on en déduise facilement la valeur de l'', nous procéderons, dans le problème dont il est question, par la voie des approximations.

Pour cela, nous considérerons d'abord l'expression de $ar'v'$ telle qu'elle est donnée un peu plus haut, savoir,

$$ar'v' = mS \cdot \frac{\frac{l'+c}{l}k' - \frac{l-l''+c}{l} \cdot \frac{k'''}{1+\delta} \cdot \frac{n+p}{n+P} - \frac{(1+\delta)f' + f'' + \delta(n+\varphi)}{(1+\delta)(n+P)}}{\frac{l'+c}{l} - \frac{l-l''+c}{l} \cdot \frac{n+p}{n+P}};$$

et nous ferons observer qu'en y supposant pour un moment $l''=l$, ce qui donne

$$k''' = \frac{l}{c},$$

elle se réduit à la suivante :

$$ar'v' = mS \frac{\frac{l'+c}{l}k' - \frac{1}{1+\delta} \cdot \frac{n+p}{n+P} - \frac{(1+\delta)f' + f'' + \delta(n+\varphi)}{(1+\delta)(n+P)}}{\frac{l'+c}{l} - \frac{c}{l} \cdot \frac{n+p}{n+P}}.$$

D'autre part, en prenant la différentielle de cette expression par rapport à l' considérée comme variable, et égalant le coefficient différentiel à zéro, on obtient la relation

$$\frac{l'}{l} + \frac{c}{l} \cdot \frac{n+p}{n+P} \log \frac{l+c}{l'+c} = \frac{1}{1+\delta} \cdot \frac{n+p+(1+\delta)f' + f'' + \delta(n+\varphi)}{n+P}. \quad (9)$$

Cette équation exprime donc la condition cherchée; et comme le terme

$$\frac{c}{l}\cdot\frac{n+p}{n+P}\log\frac{l+c}{l'+c}$$

est toujours une quantité très-petite, on peut la remplacer par la suivante :

$$\frac{l'}{l}=\frac{1}{1+\delta}\cdot\frac{n+p+(1+\delta)f'+f''+\delta(n+\varphi)}{n+P}, \qquad (9\ bis)$$

et celle-ci pourra suffire dans la plupart des recherches pratiques.

On remarquera que la solution donnée par la dernière équation, et même par l'équation (9), n'est qu'approximative, puisque nous avons, dans les formules, supposé $l''=l$, ce qui n'est pas tout à fait exact. Si l'on a besoin d'une solution précise, on devra donc, après avoir calculé l'effet utile de la machine avec cette détente, le calculer de nouveau avec une détente un peu plus grande ou un peu plus petite; et si l'on trouve que l'effet utile augmente en conséquence, on continuera de faire varier la détente dans le même sens jusqu'à ce qu'on voie que l'effet utile cesse de croître : alors, on sera parvenu au maximum cherché. Il faut ajouter que ce tâtonnement n'offre pas de difficulté, parce que ce sont toujours les mêmes nombres qui se représentent dans le calcul, et qu'ainsi on n'a que de très-légers changemens à faire pour passer d'un premier calcul au suivant. Du reste, comme, en continuant le calcul que nous venons d'indiquer, on trouve que la véritable valeur de $\frac{l'}{l}$, qui produit le maximum d'effet utile, est plus petite que celle déduite de l'équation (9 *bis*), et que, cependant, celle-ci se trouve déjà trop petite pour être admise dans la pratique, on n'aura que bien rarement besoin de pousser les recherches au delà de la solution donnée par l'équation (9 *bis*).

Ce calcul fixe donc la détente qui, étant accompagnée de la clôture du robinet d'injection la plus avantageuse pour cette détente, et en même temps de la charge la plus favorable pour cette clôture et cette détente réunies, fera produire, à la machine, le maximum absolu d'effet utile dont elle est capable. Actuellement, il semble que le contre-poids de la machine reste encore indéterminé, et qu'on pourrait également chercher à le fixer de manière à le faire concourir encore à l'augmentation de l'effet utile. Mais si l'on observe que, dans tous les cas, nous supposons la charge réglée de manière à faire produire à la machine son maximum d'effet utile, ce qui suppose $P'=P$, on reconnaîtra que cette condition fixe d'elle-même le contre-poids de la machine en fonction de la détente; de sorte que celle-ci étant déterminée, comme nous venons de le faire, le contre-poids l'est également.

En effet, en introduisant la condition $P'=P$ dans l'équation générale (A), on obtient

$$\pi=n+\varphi+\rho'+f'-\frac{l'+c}{l}k'(n+P). \qquad (8)$$

Cette relation donne donc immédiatement la valeur du contre-poids que doit avoir la machine pour que les effets voulus soient produits, puisque toutes les quantités contenues dans le second membre ont des valeurs connues. Et l'on remarquera en même temps que, si l'on avait fixé d'avance le contre-poids, cette même équation, résolue par rapport à $\frac{r}{l}$, ferait aussi connaître la détente la plus favorable pour le contre-poids fixé.

Ainsi, en définitive, en réglant la machine à la détente donnée par l'équation (9), ou, ce qui revient au même, en lui donnant le contre-poids indiqué par l'équation (8), dans laquelle on aura mis pour $\frac{r}{l}$ sa valeur déduite de l'équation (9); puis ensuite, en fixant la clôture du robinet d'injection ou de la soupape du condenseur au point marqué par l'équation (7); et, enfin, en donnant au piston la charge de l'équation (6), on fera produire à la machine le maximum absolu d'effet utile dont elle est capable.

On remarquera que, dans quelques cas, l'équation (8) pourra donner, pour la quantité Π, une valeur négative; c'est-à-dire que le contre-poids le plus avantageux pour l'action de la machine devrait alors être appliqué en faveur de la pression atmosphérique, et non dans le sens d'action de la vapeur. Ce n'est pas qu'on ne puisse, dans ce cas, employer un contre-poids différent et l'appliquer dans le sens ordinaire, mais il produira un moindre effet utile. En effet, on trouvera toujours alors que, pour régler la machine avec ce contre-poids, on la soumettra à l'une des quatre pertes d'effet suivantes: ou bien il faudra faire baisser la pression dans la chaudière, au moyen du registre de la cheminée, pour éviter le choc qui aurait lieu à la fin de chaque course montante par la trop grande prépondérance du contre-poids en faveur de la vapeur; ou bien il faudra n'ouvrir le régulateur que partiellement pour arriver au même résultat; ou bien à la fin de chaque course montante, il faudra ouvrir le robinet d'injection avant que le piston soit arrivé au sommet de sa course; ou, enfin, il faudra laisser frapper le balancier contre les gardes du mouvement. Dans les trois premiers cas, on perdra une partie de l'effet dû à la détente de la vapeur, puisque cette détente n'aura plus lieu qu'à partir d'une pression moins élevée, ou sera supprimée avant la fin de la course; et, dans le dernier cas, il y aura, contre les ressorts, un choc représenté par la chute d'un poids égal à la trop grande prépondérance du contre-poids. Ainsi que nous l'avons dit plus haut, on aura donc toujours une perte d'effet utile; mais, comme l'application du contre-poids supposé pourra mieux convenir à certaines conditions particulières du travail, il pourra arriver, en définitive, qu'il devienne préférable dans l'application.

En résumé, nous devons répéter, d'une manière générale, que si la détente de la vapeur, le contre-poids, la clôture du robinet d'injection ou la charge de la

machine qui sont propres à produire le maximum d'effet utile, offrent des inconvéniens ou des impossibilités dans la pratique, on devra se borner à choisir, parmi les valeurs possibles de ces quantités, celles qui s'écarteront le moins des résultats du calcul. Elles donneront alors la vraie solution du problème, puisqu'elles seront les plus avantageuses que l'application puisse permettre.

§ VII. *Tables pour la solution numérique des formules pour les machines atmosphériques.*

Comme les formules qui précèdent contiennent les expressions logarithmiques k' et k''' dont le calcul peut présenter quelque longueur, nous donnons ici des Tables qui en feront connaître la valeur à simple vue.

TABLE POUR LA SOLUTION NUMÉRIQUE DES FORMULES. — (MACHINES ATMOSPHÉRIQUES).

No. IV.

Portion de la course montante parcourue pendant l'admission de la vapeur sous le piston, ou valeur de la fraction $\frac{r}{l}$.	Valeur correspondante de k', ou de l'expression $\left(\frac{r}{r+c} + \log \frac{l+c}{r+c}\right)$.			Portion de la course montante parcourue pendant l'admission de la vapeur sous le piston, ou valeur de la fraction $\frac{r}{l}$.	Valeur correspondante de k', ou de l'expression $\left(\frac{r}{r+c} + \log \frac{l+c}{r+c}\right)$.		
	$\frac{c}{l} = 0.1.$	$\frac{c}{l} = 0.2.$	$\frac{c}{l} = 0.3.$		$\frac{c}{l} = 0.1.$	$\frac{c}{l} = 0.2.$	$\frac{c}{l} = 0.3.$
0.10	2.205	1.720	1.429	0.56	1.359	1.194	1.064
0.11	2.180	1.708	1.422	0.57	1.347	1.184	1.057
0.12	2.155	1.697	1.416	0.58	1.334	1.174	1.049
0.13	2.130	1.685	1.409	0.59	1.321	1.165	1.042
0.14	2.105	1.673	1.402	0.60	1.309	1.156	1.034
0.15	2.082	1.661	1.394	0.61	1.297	1.146	1.027
0.16	2.058	1.649	1.387	0.62	1.285	1.137	1.020
0.17	2.035	1.636	1.379	0.63	1.273	1.128	1.012
0.18	2.012	1.624	1.371	0.64	1.261	1.119	1.005
0.19	1.988	1.611	1.363	0.65	1.250	1.110	0.998
0.20	1.966	1.599	1.356	0.66	1.238	1.101	0.991
0.21	1.944	1.586	1.348	0.67	1.227	1.092	0.984
0.22	1.922	1.574	1.339	0.68	1.215	1.083	0.976
0.23	1.901	1.561	1.331	0.69	1.204	1.074	0.969
0.24	1.880	1.549	1.323	0.70	1.193	1.066	0.962
0.25	1.860	1.536	1.315	0.71	1.183	1.057	0.955
0.26	1.839	1.524	1.306	0.72	1.172	1.048	0.948
0.27	1.819	1.512	1.298	0.73	1.161	1.040	0.942
0.28	1.800	1.500	1.290	0.74	1.151	1.031	0.935
0.29	1.781	1.488	1.282	0.75	1.140	1.023	0.928
0.30	1.762	1.476	1.273	0.76	1.130	1.015	0.921
0.31	1.743	1.464	1.265	0.77	1.120	1.007	0.914
0.32	1.725	1.452	1.257	0.78	1.110	0.998	0.908
0.33	1.707	1.440	1.248	0.79	1.100	0.990	0.901
0.34	1.689	1.428	1.240	0.80	1.090	0.982	0.894
0.35	1.672	1.417	1.231	0.81	1.080	0.974	0.888
0.36	1.654	1.405	1.223	0 82	1.070	0.966	0.881
0.37	1.637	1.394	1.215	0.83	1.060	0.959	0.875
0.38	1.621	1.382	1.207	0.84	1.050	0.951	0.868
0.39	1.605	1.371	1.199	0.85	1.041	0.943	0.862
0.40	1.588	1.360	1.190	0.86	1.032	0.935	0.855
0.41	1.573	1.349	1.182	0.87	1.023	0.928	0.849
0.42	1.557	1.338	1.174	0.88	1.014	0.920	0.843
0.43	1.542	1.327	1.166	0.89	1.005	0.913	0.836
0.44	1.526	1.316	1.158	0.90	0.996	0.905	0.830
0.45	1.511	1.305	1.150	0.91	0.987	0.898	0.824
0.46	1.496	1.295	1.142	0.92	0.978	0.890	0.818
0.47	1.482	1.284	1.134	0.93	0.969	0.883	0.811
0.48	1.468	1.274	1.126	0.94	0.960	0.876	0.805
0 49	1.453	1.264	1.118	0.95	0.951	0.869	0.799
0.50	1.439	1.253	1.111	0.96	0.943	0.861	0.793
0.51	1.426	1.243	1.103	0.97	0.934	0.854	0.787
0.52	1.412	1.233	1.095	0.98	0.926	0.847	0.781
0.53	1.399	1.223	1.087	0.99	0.918	0.840	0.775
0.54	1.385	1.213	1.080	1.00	0.909	0.833	0.769
0.55	1.372	1.203	1.072				

TABLE POUR LA SOLUTION NUMÉRIQUE DES FORMULES.

(MACHINES ATMOSPHÉRIQUES.)

N°. V.

PORTION DE LA COURSE descendante parcourue avant la clôture du robinet d'injection, ou valeur de la fraction $\frac{l'}{l}$.	VALEUR CORRESPONDANTE de k''', ou de l'expression $\frac{l'}{l-l'+c}+\log\frac{l-l'+c}{c}$			PORTION DE LA COURSE descendante parcourue avant la clôture du robinet d'injection, ou valeur de la fraction $\frac{l'}{l}$.	VALEUR CORRESPONDANTE de k''', ou de l'expression $\frac{l'}{l-l'+c}+\log\frac{l-l'+c}{c}$		
	$\frac{c}{l}=0.1.$	$\frac{c}{l}=0.2.$	$\frac{c}{l}=0.3.$		$\frac{c}{l}=0.1.$	$\frac{c}{l}=0.2.$	$\frac{c}{l}=0.3.$
0.50	2.625	1.967	1.606	0.76	3.439	2.516	1.995
0.51	2.639	1.978	1.614	0.77	3.527	2.556	2.022
0.52	2.654	1.989	1.622	0.78	3.601	2.599	2.050
0.53	2.670	2.000	1.631	0.79	3.680	2.643	2.080
0.54	2.687	2.012	1.640	0.80	3.765	2.693	2.111
0.55	2.705	2.025	1.650	0.81	3.858	2.745	2.144
0.56	2.724	2.038	1.660	0.82	3.958	2.800	2.178
0.57	2.744	2.052	1.670	0.83	4.067	2.858	2.215
0.58	2.764	2.067	1.681	0.84	4.186	2.921	2.254
0.59	2.786	2.083	1.692	0.85	4.316	2.988	2.294
0.60	2.809	2.099	1.704	0.86	4.459	3.060	2.337
0.61	2.834	2.116	1.717	0.87	4.616	3.137	2.383
0.62	2.860	2.134	1.730	0.88	4.788	3.220	2.432
0.63	2.888	2.153	1.744	0.89	4.980	3.309	2.483
0.64	2.917	2.173	1.758	0.90	5.193	3.406	2.538
0.65	2.949	2.194	1.773	0.91	5.431	3.510	2.596
0.66	2.982	2.216	1.789	0.92	5.699	3.622	2.658
0.67	3.017	2.239	1.805	0.93	6.001	3.745	2.723
0.68	3.054	2.263	1.823	0.94	6.345	3.878	2.793
0.69	3.094	2.289	1.841	0.95	6.739	4.023	2.868
0.70	3.136	2.316	1.860	0.96	7.194	4.182	2.949
0.71	3.182	2.345	1.880	0.97	7.724	4.357	3.035
0.72	3.230	2.376	1.901	0.98	8.349	4.550	3.127
0.73	3.281	2.408	1.923	0.99	9.096	4.763	3.226
0.74	3.337	2.442	1.946	1.00	10.000	5.000	3.333
0.75	3.396	2.478	1.970				

ARTICLE III.

FORMULES PRATIQUES POUR LE CALCUL DES MACHINES ATMOSPHÉRIQUES, ET EXEMPLE DE LEUR APPLICATION.

Pour obtenir les formules pratiques convenables au calcul des machines atmosphériques, il faut, dans les équations algébriques développées précédemment, remplacer les quantités constantes par leur valeur déduite de l'expérience ou de l'observation.

Dans ces machines, la pression P de la vapeur dans la chaudière est ordinairement d'une livre et demie à deux livres par pouce carré au-dessus de la pression atmosphérique; c'est-à-dire qu'on a, en général,

$$P = 16.5 \times 144 \text{ livres par pied carré.}$$

La pression atmosphérique varie suivant l'état de l'atmosphère, et, dans le cas d'expériences délicates, il est nécessaire de la mesurer exactement d'après l'observation du baromètre; mais, dans les calculs généraux, on peut la prendre à sa valeur moyenne, qui est de 14.71 livres par pouce carré. En la rapportant au pied carré, on a donc

$$\varphi = 14.71 \times 144 \text{ lbs.}$$

La pression p de condensation dans le cylindre doit être observée directement dans chaque cas où la chose est possible. On se servira pour cela de l'*indicateur de la pression* de Watt, si la machine a un condenseur; et si elle n'en a pas, on pourra se contenter de prendre la température de l'eau qui sort du cylindre après la condensation. Cette température étant aussi celle de la vapeur avec laquelle l'eau était en contact, en consultant les Tables de correspondance entre la pression et la température dans les vapeurs en contact avec le liquide, chap. II, art. I, § III, on connaîtra la pression de condensation sous le piston. La température de condensation, ainsi observée dans un grand nombre de machines atmosphériques, s'est trouvée varier entre 142 et 174 degrés du thermomètre de Fahrenheit, ce qui correspond à des pressions de condensation comprises entre 3 et 7 livres par pouce carré. Ainsi, en rapportant cette pression au pied carré, on aura le plus ordinairement

$$p = 4.7 \times 144 \text{ lbs.}$$

Cependant, comme il y a des machines où, pour empêcher la course descendante de se faire trop rapidement, on laisse pénétrer un peu d'air sous le piston par un robinet destiné à cet usage, il faudra, dans ce cas, tenir compte approximativement du surcroît de résistance dû au ressort de cet air; ou, ce qui est

mieux, il faudra recourir à l'*indicateur*, pour avoir la pression sous le piston. Il est évident, du reste, que l'emploi de ce robinet prouve un règlement imparfait de la machine, et qu'il détruit, sans utilité, une partie de la force motrice. Il doit donc être évité autant que possible.

Relativement à la valeur des frottemens f', f'' et δ, nous manquons d'expériences spéciales qui puissent nous donner des notions certaines à ce sujet; mais, pour être en mesure de montrer la marche du calcul dans les applications, nous estimerons approximativement ces quantités dans les machines atmosphériques, d'après leur valeur dans les machines de Watt à simple action. La construction peu dissemblable de ces deux espèces de machines nous donne lieu de penser, en effet, que cette évaluation sera assez voisine de la vérité pour que les résultats obtenus par ce moyen puissent être de quelque utilité dans la pratique.

Dans les machines atmosphériques munies, comme les machines de Watt, d'un condenseur séparé et d'une pompe d'air, nous évaluerons donc le frottement d'après les formules déjà données, savoir :

$$f' = \frac{350}{d}, \quad f'' = \frac{250}{d},$$

dans lesquelles d représente, en pieds, le diamètre du cylindre de la machine dont il est question, et f' et f'' le frottement respectif de chaque course, en y comprenant, d'une part, le travail de la pompe d'air, et, de l'autre, celui des pompes d'eau chaude et d'eau froide.

Si la machine n'a pas de condenseur, c'est-à-dire si la condensation se fait dans le cylindre à vapeur lui-même, la valeur de f' sera diminuée du travail de la pompe d'air, qui n'existe pas, et le frottement sera sensiblement le même dans les deux courses; mais comme ce cas ne se présente que dans de très-anciennes machines, dont la construction est beaucoup moins perfectionnée que celle des machines modernes, il n'est guère possible de leur supposer un frottement égal à celui d'une machine de Watt. Dans ce cas donc, on pourra prendre approximativement

$$f' = f'' = \frac{450}{d};$$

mais, du reste, ce frottement est si peu de chose, qu'un léger changement dans sa valeur altérerait à peine les résultats.

En même temps, nous ferons, comme précédemment,

$$\delta = 0.14;$$

et, de plus, ces machines étant à condensation, les constantes m et n du volume spécifique de la vapeur auront, en mesures anglaises, les valeurs suivantes :

$$m = 4{,}100{,}000,$$
$$n = 250.$$

Enfin, quant à la vaporisation *effective*, il y a, dans ces machines, une distinction à faire entre celles qui sont munies d'un condenseur séparé et celles qui n'en ont pas, c'est-à-dire dans lesquelles la vapeur est condensée dans le cylindre même, suivant le mode adopté avant l'invention du condenseur et pendant la durée du brevet que Watt obtint pour cet objet. Dans les machines à condenseur, on peut évaluer la vaporisation effective au même taux que dans les machines de Watt, c'est-à-dire à 0.95 de la vaporisation brute. Mais, dans les machines sans condenseur, comme à chaque coup de piston, le cylindre est d'abord refroidi à la température de condensation, et qu'il doit être ensuite réchauffé par la vapeur de la chaudière à la température correspondante à la pression que prend définitivement la vapeur à son entrée dans le cylindre, il est clair qu'il doit y avoir une perte considérable de vapeur due à cette cause. Watt a reconnu, par un grand nombre d'observations directes, que, dans les machines atmosphériques le moins sujettes à la perte dont nous nous occupons, la condensation qui a lieu par suite du refroidissement du cylindre s'élève à 0.75 de la vapeur utilisée; et que dans celles qui, au contraire, y sont le plus sujettes, cette condensation s'élève à deux fois la vapeur utilisée. (*The articles Steam and Steam-engines, by* John Robison, *with Notes and Additions by* James Watt. *Edinburgh*, 1818, p. 66 et 95.) Mais comme le dernier cas mentionné paraît un cas exceptionnel qui doit tenir à quelque défaut particulier, nous croyons que, dans les machines en bon état, on sera plus près de la vérité en prenant la perte de condensation comme variant entre 0.75 et 1.00 de la vaporisation utile. D'un autre côté, comme la vaporisation effective S, plus la perte due à la condensation, est égale à la vaporisation brute S', il s'ensuit que, dans ces machines, la vaporisation effective se trouve comprise entre les deux valeurs suivantes :

$$S = \frac{S'}{1.75} = 0.57\ S', \text{ et } S = \frac{S'}{2} = 0.50\, S',$$

ce qui donne pour moyenne

$$S = 0.535\ S'.$$

D'après ces données, pour obtenir les formules pratiques qui conviennent au calcul de ces machines, il faudrait pouvoir substituer, dans les équations algébriques développées, la valeur de chacune des constantes qui y figurent; mais comme les pressions P et p varient dans les différentes machines, et que l'évaluation que nous avons donnée des frottemens varie également selon le diamètre du cylindre, nous nous contenterons de substituer les valeurs de φ, m et n. Alors, les équations algébriques seront remplacées par les suivantes :

Formules pratiques pour les machines atmosphériques (mesures anglaises).

CAS D'UNE CHARGE OU D'UNE VITESSE QUELCONQUES, AVEC UNE CLÔTURE DU ROBINET D'INJECTION ET UNE DÉTENTE OU UN CONTRE-POIDS DONNÉS.

$$v = 4{,}100{,}000\,\frac{S}{a}\cdot\frac{(1+\delta)k'}{(1+\delta)(r+f')+f''+2368\delta+\frac{l-l''+c}{l}(250+p)[k'''-(1+\delta)k']}.$$

Vitesse du piston, en pieds, par minute.

$$ar = 4{,}100{,}000\,\frac{S}{v}k' - a\,\frac{l-l''+c}{l}\left(\frac{k'''}{1+\delta}-k'\right)(250+p) - \frac{a}{1+\delta}[(1+\delta)f'+f''+2368\delta].$$

Charge utile du piston, en livres.

$$S = \frac{av}{4{,}100{,}000}\cdot\frac{(1+\delta)(r+f')+f''+2368\delta+\frac{l-l''+c}{l}(250+p)[k'''-(1+\delta)k']}{(1+\delta)k'}.$$

Vaporisation effective, en pieds cubes d'eau, par minute.

$\text{E. u.} = arv$. . . . . Effet utile, en livres élevées à 1 pied, par minute.

$\text{E. u. ch.} = \frac{arv}{33000}$. . . . . Effet utile, en chevaux.

$\text{E. u. 1 lb. co.} = \frac{arv}{N}$. . . . . Effet utile de 1 livre de combustible, en livres élevées à 1 pied.

$\text{E. u. 1 p. e.} = \frac{arv}{S}$. . . . . Effet utile de 1 pied cube d'eau vaporisé, en livres élevées à 1 pied.

$\text{Q. co. pr. 1 ch.} = \frac{33000\,N}{arv}$. . . . . Quantité de combustible, en livres, qui produit l'effet d'un cheval.

$\text{Q. e. pr. 1 ch.} = \frac{33000\,S}{arv}$. . . . . Quantité d'eau, en pieds cubes, qui produit l'effet d'un cheval.

$\text{E.u.ch.pr.1 lb.co.} = \frac{arv}{33000\,N}$. . . . . Effet utile, en chevaux, produit par livre de combustible.

$\text{E.u.ch.pr.1 p.e.} = \frac{arv}{33000\,S}$. . . . . Effet utile, en chevaux, produit par pied cube d'eau vaporisé.

CAS DU MAXIMUM D'EFFET UTILE, AVEC UNE CLÔTURE DU ROBINET D'INJECTION ET UNE DÉTENTE OU UN CONTRE-POIDS DONNÉS.

$$v' = \frac{S}{a}\cdot\frac{4{,}100{,}000}{\frac{l'+c}{l}(250+P) - \frac{l-l'+c}{l}(250+p)}.$$

Vitesse du piston, en pieds, par minute.

$$ar' = a\frac{l'+c}{l}k'(250+P) - \frac{a}{1+\delta}\cdot\frac{l-l''+c}{l}k'''(250+p) - \frac{a}{1+\delta}[(1+\delta)f'+f''+2368\delta].$$

Charge utile du piston, en livres.

$$S = \frac{av'}{4,100,000}\left[\frac{l'+c}{l}(250+P) - \frac{l-l''+c}{l}(250+p)\right].$$

Vaporisation effective, en pieds cubes d'eau, par minute.

E. u. $= ar'v'$. . . . . Effet utile, en livres élevées à 1 pied, par minute.

CLÔTURE DU ROBINET D'INJECTION, QUI PRODUIT LE MAXIMUM D'EFFET UTILE, POUR UNE DÉTENTE OU UN CONTRE-POIDS DONNÉS.

$$\frac{l}{l'+c}\cdot\frac{250+p}{250+P}\cdot\frac{l''}{l} + \log\frac{l-l''+c}{c} = (1+\delta)k' - \frac{l}{l'+c}\cdot\frac{(1+\delta)f'+f''+2368\delta}{250+P}.$$

Condition qui fixe la clôture du robinet d'injection, ou la valeur de $\frac{l''}{l}$.

DÉTENTE, OU CONTRE-POIDS, QUI PRODUISENT LE MAXIMUM ABSOLU D'EFFET UTILE.

$$\frac{l'}{l} = \frac{1}{1+\delta}\cdot\frac{250+p+(1+\delta)f'+f''+2368\delta}{250+P}.$$

Valeur approximative de la détente qui produit le maximum absolu d'effet utile.

$\Pi = 2368 + p' + f' - \frac{l'+c}{l}k'(250+P)$. Contre-poids correspondant, en livres, par pied carré de la surface du piston.

Pour montrer maintenant une application numérique de ces formules, nous supposerons qu'il s'agit de calculer les effets de la machine atmosphérique établis à la mine de houille de *Long-Benton*, près Newcastle, par le célèbre ingénieur anglais Smeaton. Cette machine est bien connue, ayant servi de modèle à toutes celles de ce système, jusqu'au temps de Watt. Elle était sans condenseur, et présentait les dimensions et données suivantes :

Diamètre du cylindre, 52 pouces anglais, ou surface du piston $a = 14.75$ pieds carrés.
Course du piston, $l = 7$ pieds.
Liberté du cylindre, 0.29 de la course utile du piston; ou $c = 0.29l$.
Pression absolue de la vapeur dans la chaudière, 16.5 livres par pouce carré; ou $P = 16.5 \times 144$ livres par pied carré.
Température de condensation, 152 degrés du thermomètre de Fahrenheit, ce qui donne, pour la pression de condensation, 4 livres par pouce carré; mais comme, pour empêcher la course descendante de se faire trop rapidement, on laissait entrer un peu d'air sous

le piston, par un robinet destiné à cet usage, la pression sous le piston pouvait être évaluée à 4.25 lbs par pouce carré ; ou $p = 4.25 \times 144$ lbs par pied carré.

Vaporisation brute de la chaudière, 90 pieds cubes d'eau par heure, ou 1.50 pied cube d'eau par minute ; ce qui, d'après l'observation moyenne dans les machines *sans condenseur*, donne, pour la vaporisation *effective*, $S = 0.535 \times 1.50 = 0.80$ pied cube d'eau par minute.

Consommation de houille de première qualité, 714 livres par heure ; ce qui fait 11.9 livres par minute, ou $N = 11.9$.

Contre-poids, 1.25 par pouce carré de la surface du piston ; ou $\Pi = 1.25 \times 144$ lbs par pied carré.

Charge de la pompe foulante, mise en jeu dans la course montante pour tirer du puits l'eau servant à l'alimentation du réservoir d'eau froide et faisant partie de l'effet utile, 0.44 livre par pouce carré de la surface du piston ; ou $\rho' = 0.44 \times 144$ lbs par pied carré.

Avec ces données, la machine prenait une vitesse de 84 pieds par minute, quand la charge ρ'' de la pompe principale, ou pompe élévatoire, mise en jeu dans la course descendante, était de 7.07 livres par pouce carré de la surface du piston, c'est-à-dire quand on avait $\rho'' = 7.07 \times 144$ lbs par pied carré. Dans ce cas, en ajoutant à cette charge celle de la pompe foulante déjà mentionnée, on voit que la charge totale soulevée par le piston dans une oscillation complète de la machine était $r = \rho' + \rho'' = 7.51 \times 144$ lbs par pied carré de la surface du piston.

Cela posé, pour soumettre cette machine au calcul, nous chercherons d'abord les effets qu'elle devait produire en y adoptant la charge et le contre-poids fixés, avec les autres circonstances du travail développées plus haut ; puis, ensuite, nous chercherons quelle est la charge, la clôture du robinet d'injection et la détente ou le contre-poids, qui lui auraient fait produire son maximum d'effet utile.

Pour exécuter le premier de ces calculs d'une manière rigoureuse, il faudrait avoir le point de clôture du robinet d'injection de la machine dans la course descendante, et le point de clôture du régulateur ou détente dans la course montante. Ces deux élémens du calcul ne nous ont pas été transmis d'une manière précise ; mais, nous aurons une valeur moyenne assez voisine de la vérité, en prenant $\frac{l'}{l} = 0.90$ et $\frac{l''}{l} = 0.80$. Du reste, de légers changemens à ces quantités, en conservant toutefois la charge et le contre-poids fixés, ne produiraient que des changemens peu importans dans les résultats du calcul ; et si l'on voulait supposer pour l' et l'' des valeurs plus grandes, on remarquera que les résultats correspondans pour les effets de la machine deviendraient un peu moindres, ce qui les rapprocherait de ceux de l'expérience, comme on le verra bientôt.

En introduisant donc les diverses données précédentes dans les formules pratiques, pour déterminer d'abord la charge que pouvait supporter la machine à la vitesse de 84 pieds par minute d'après l'équation (2); puis, faisant usage de cette

vitesse et de la charge correspondante, pour avoir les effets utiles de la machine, on obtiendra les résultats du tableau suivant :

Effets de la machine à la vitesse donnée, avec la clôture du régulateur, la détente et le contre-poids fixés.

$$\frac{l'}{l} = 0.90, \qquad \frac{l''}{l} = 0.80, \qquad \frac{\Pi}{144} = 1.25 \text{ lbs.}$$

v.	= 84
ar.	= 17868
$\frac{r}{144}$.	= 8.41
S.	= 0.80
E. u.	= 1,500,930
E. u. ch.	= 45.5
E. u. 1 lb. co. . . .	= 126,130
E. u. 1 p. e.	= 1,876,200
Q. co. pr. 1 ch. . . .	= 0.262
Q. e. pr. 1 ch.	= 0.0176
E. u. ch. pr. 1 lb. co.	= 3.82
E. u. ch. pr. 1 p. e. .	= 58.85

On voit, d'après ces résultats, que pour la vitesse de l'observation et les autres conditions du travail, la charge de la machine devait être de 8.41 livres par pouce carré du piston; mais si l'on observe que, faute de données à cet égard, nous n'avons pu tenir compte de la résistance de l'eau dans le tuyau d'ascension, ni du frottement des pistons et clapets de la pompe d'épuisement, on trouvera que ce résultat devrait être quelque peu réduit pour représenter la charge vraiment *utile* de la machine. Or, l'expérience de Smeaton a donné, pour la même vitesse de 84 pieds par minute, une charge utile de 7.51 livres par pouce carré de la surface du piston, qui n'est que très-peu inférieure à celle que nous venons d'obtenir. Cette expérience peut donc être considérée comme une confirmation des formules précédentes, autant du moins que les données qui nous sont transmises sur la machine en question permettent d'en établir le calcul.

Nous venons de déterminer quels devaient être les effets de la machine dans les conditions données. Mais, maintenant, si l'on cherche d'abord la détente la plus favorable pour le travail de la machine, d'après l'équation (9), ainsi que le contre-poids correspondant d'après l'équation (8), puis la clôture la plus avantageuse du robinet d'injection et la charge la plus convenable du piston par les équations (7) et (6); ensuite, si l'on suppose également la machine réglée à diverses autres détentes plus convenables à la pratique, et qu'on détermine de même, pour ces détentes respectives, le contre-poids, la clôture d'injection et la charge du maximum d'effet, on obtiendra les nombres que nous allons rapporter.

On remarquera seulement que la formule approximative déduite de l'équation (9 *bis*), pour avoir la détente du maximum absolu d'effet utile, donne pour cette détente $\frac{l'}{l} = 0.45$; mais comme, en continuant le calcul, ainsi que nous l'avons indiqué plus haut, on trouve que l'effet utile continue de croître à mesure qu'on diminue $\frac{l'}{l}$, jusqu'à la valeur 0.34, il s'ensuit que c'est cette dernière détente qui satisfait en réalité à la condition voulue.

Effets de la machine, avec diverses détentes et avec le contre-poids, la clôture du robinet d'injection et la charge le plus favorables à chacune de ces détentes respectives.

			Maximum d'effet utile.
$\frac{l'}{l}$	= 0.90	... 0.60	... 0.34
$\frac{\text{II}}{144}$	= − 0.58	... 0.57	... 2.99
$\frac{l''}{l}$	= 0.77	... 0.69	... 0.65
v'	= 79.72	... 115.95	... 187.53
ar'	= 19633	... 16668	... 11239
$\frac{r'}{144}$	= 9.24	... 7.85	... 5.29
S	= 0.80	... 0.80	... 0.80
E. u.	= 1,565,170	... 1,932,700	... 2,107,700
E. u. ch.	= 47.43	... 58.57	... 63.87
E. u. 1 lb. co.	= 131,530	... 162,410	... 177,110
E. u. 1 p. e.	= 1,956,450	... 2,415,850	... 2,634,600
Q. co. pr. 1 ch.	= 0.251	... 0.203	... 0.186
Q. e. pr. 1 ch.	= 0.0169	... 0.0137	... 0.0125
E. u. ch. pr. 1 lb. co.	= 3.99	... 4.92	... 5.37
E. u. ch. pr. 1 p. e.	= 59.29	... 73.21	... 79.84

Ces résultats font voir que le règlement le plus avantageux de la machine consisterait à fermer le régulateur à 0.34 de la course montante, et le robinet d'injection à 0.65 de la course descendante, à appliquer dans le sens ordinaire un contre-poids de 2.99 livres par pouce carré du piston, et enfin à donner au piston une charge totale de 5.29 livres par pouce carré de sa surface. On obtiendrait alors de la machine son plus grand effet possible; car, en exécutant le calcul pour la détente $\frac{l'}{l} = 0.45$ qui résulte de l'équation (9 *bis*), et pour diverses autres détentes plus voisines de 0.34, on obtient, pour les effets utiles, les nombres suivans:

$\frac{l'}{l} = 0.45$	E. u. max. = 2,074,650	
0.35	2,104,800	
0.34	2,107,700	maximum absolu.
0.33	2,103,800	

Le règlement indiqué plus haut serait donc le plus avantageux, et l'effet de la machine serait de 64 chevaux; mais comme, avec une détente si considérable de la vapeur, le mouvement du piston serait trop inégal, et que d'ailleurs ce règlement suppose une charge qui pourrait exiger des changemens dans la machine, nous avons supposé l'exemple d'une détente égale à 0.60: alors l'effet en chevaux de la machine se réduira de 64 chevaux à 58.6. Enfin, en conservant la détente 0.90 du calcul donné plus haut, mais accompagnant cette détente des conditions qui lui sont le plus avantageuses, c'est-à-dire en fermant le robinet d'injection à 0.77 de la course descendante, appliquant, non dans le sens de la vapeur, mais en faveur de la pression atmosphérique, un contre-poids de 0.58 livre par pouce carré de la surface du piston, et, enfin, élevant la charge totale de celui-ci à 9.24 livres par pouce carré, l'effet de la machine, avec même dépense d'eau et de combustible, sera encore de 47 chevaux, au lieu de 43 qu'elle était dans les conditions de l'expérience.

Ces considérations montrent l'usage du calcul, et font voir qu'il permet de déterminer les conditions les plus avantageuses au travail d'une machine donnée. Si l'on considère qu'il y a quatre élémens originaux que l'on peut faire varier dans la machine, savoir: la clôture du régulateur, celle du robinet d'injection, le contre-poids et la charge du piston, on comprendra l'embarras où l'on se trouve nécessairement dans la pratique, pour choisir entre plusieurs centaines de combinaisons, celle qui est la plus avantageuse au travail. Si l'on remarque de plus que, pour remédier à un règlement imparfait, on complique encore l'action mutuelle des élémens que nous venons de mentionner, par l'introduction de nouvelles circonstances, telles que le choc du balancier contre les gardes du mouvement, l'introduction de l'air dans le cylindre pendant la chute du piston, l'ouverture anticipée du régulateur avant la terminaison de la course descendante, et celle du robinet d'injection avant la fin de la course montante, circonstances qui viennent encore modifier les effets naturels de la machine, tout en produisant une perte dans son effet utile, on reconnaîtra l'impossibilité qu'il y a d'arriver au meilleur règlement possible de la machine par un tâtonnement purement expérimental. Aussi, la machine atmosphérique est-elle restée, plus que toutes les autres, dans l'obscurité, relativement au meilleur chargement à lui donner, au contre-poids le plus avantageux et à la meilleure proportion à établir entre les élémens divers qui contribuent à son effet utile. Les auteurs modernes qui se sont le plus occupés de ces matières n'ont pas même essayé d'aborder la question; et Watt, dans ses Notes aux

articles *Vapeur* et *Machines à vapeur* de *l'Encyclopédie anglaise* de Robison, reconnaît l'impossibilité absolue où il est de donner des règles à cet égard, parce que, dit-il, les principes qui règlent l'action de ces machines ne sont pas suffisamment connus pour cela (1). La facilité avec laquelle on calcule ces machines, aussi bien que toutes les autres, par la théorie que nous avons exposée, fournit donc une dernière preuve de la généralité et de l'exactitude de cette théorie.

Pour obtenir, en mesures françaises, les formules pratiques que nous venons d'exposer, il faut observer que les valeurs des constantes reviennent alors aux suivantes :

Pression absolue de la vapeur dans la chaudière, 1.1596 kilogramme par centimètre carré ; ou $P = 11596$ kilogrammes par mètre carré.

Pression atmosphérique, 1.033 kilogramme par centimètre carré ; ou $\varphi = 10330$ kilogrammes par mètre carré.

Pression ordinaire de condensation dans le cylindre, 0.3303 kilogramme par centimètre carré ; ou $p = 3303$ kilogrammes par mètre carré.

Frottement de la machine non chargée, exprimé en kilogrammes par mètre carré de la surface du piston, pour une machine à condenseur,

$$f' = \frac{325}{d}, \quad f'' = \frac{375}{d};$$

et pour une machine sans condenseur,

$$f' = f'' = \frac{675}{d},$$

la lettre d représentant d'ailleurs le diamètre du cylindre exprimé en mètres.

Frottement additionnel de la machine, par unité de la résistance imposée sur le piston, $\frac{1}{7}$ de cette résistance, ou $\delta = 0.14$.

Constantes du volume spécifique de la vapeur,

$$m = 20{,}000{,}000,$$
$$n = 1200.$$

Vaporisation effective moyenne, pour une machine à condenseur, 0.95, et pour une machine sans condenseur, 0.535 de la vaporisation brute; ou, dans le second cas, $S = 0.535\ S'$.

Cela posé, en faisant les substitutions principales, on obtient les formules qui suivent :

---

(1) *The articles* STEAM *and* STEAM-ENGINES, *by* John Robison, *with Notes and Additions by* James Watt. *Edinburgh*, 1818; pages 81, 97, 103.

Formules pratiques pour les machines atmosphériques
(mesures françaises).

CAS D'UNE CHARGE OU D'UNE VITESSE QUELCONQUES, AVEC UNE CLÔTURE DU ROBINET D'INJECTION ET UNE DÉTENTE OU UN CONTRE-POIDS DONNÉS.

$$v = 20,000,000 \frac{S}{a} \cdot \frac{(1+\delta)k'}{(1+\delta)(r+f')+f''+11535\delta+\frac{l-l''+c}{l}(1200+p)[k'''-(1+\delta)k']}.$$

Vitesse du piston, en mètres, par minute.

$$ar = 20,000,000 \frac{S}{v} k' - a\frac{l-l''+c}{l}\left(\frac{k'''}{1+\delta}-k'\right)(1200+p) - \frac{a}{1+\delta}[(1+\delta)f'+f''+11535\delta].$$

Charge utile du piston, en kilogrammes.

$$S = \frac{av}{20,000,000} \cdot \frac{(1+\delta)(r+f')+f''+11535\delta+\frac{l-l''+c}{l}(1200+p)[k'''-(1+\delta)k']}{(1+\delta)k'}.$$

Vaporisation effective, en mètres cubes d'eau, par minute.

$\text{E. u.} = arv$. . . . . Effet utile, en kilogrammes élevés à 1 mètre par minute.

$\text{E. u. ch.} = \frac{arv}{4500}$. . . . . Effet utile, en chevaux.

$\text{E. u. 1 k. co.} = \frac{arv}{N}$. . . . . Effet utile de 1 kilogramme de combustible, en kilogrammes élevés à 1 mètre.

$\text{E. u. 1 m. e.} = \frac{arv}{S}$. . . . . Effet utile de 1 mètre cube d'eau, en kilogrammes élevés à 1 mètre.

$\text{Q. co. pr. 1 ch.} = \frac{4500\,N}{arv}$. . . . . Quantité de combustible, en kilogrammes, qui produit l'effet d'un cheval.

$\text{Q. e. pr. 1 ch.} = \frac{4500\,S}{arv}$. . . . . Quantité d'eau, en mètres cubes, qui produit l'effet d'un cheval.

$\text{E.u.ch. pr. 1 k. co.} = \frac{arv}{4500\,N}$. . . . . Effet utile, en chevaux, produit par kilogramme de combustible.

$\text{E. u. ch. pr. 1 m. e.} = \frac{arv}{4500\,S}$. . . . . Effet utile, en chevaux, produit par mètre cube d'eau vaporisé.

CAS DU MAXIMUM D'EFFET UTILE, POUR UNE CLÔTURE DU ROBINET D'INJECTION ET UNE DÉTENTE OU UN CONTRE-POIDS DONNÉS.

$$v' = \frac{S}{a} \cdot \frac{20,000,000}{\frac{l'+c}{l}(1200+P)-\frac{l-l''+c}{l}(1200+p)}.$$

Vitesse du piston, en mètres, par minute.

$$ar' = a\frac{l'+c}{l}k'(1200+P) - \frac{a}{1+\delta}\cdot\frac{l-l''+c}{l}k'''(1200+p) - \frac{a}{1+\delta}[(1+\delta)f'+f''+11535\delta].$$

Charge utile du piston, en kilogrammes.

$$S = \frac{av'}{20{,}000{,}000}\left[\frac{l'+c}{l}(1200+P) - \frac{l-l''+c}{l}(1200+p)\right].$$

Vaporisation effective, en mètres cubes d'eau, par minute.

$E.\ u. = ar'v'$. . . . . Effet utile, en kilogrammes élevés à 1 mètre, par minute.

CLÔTURE DU ROBINET D'INJECTION QUI PRODUIT LE MAXIMUM D'EFFET UTILE, POUR UNE DÉTENTE OU UN CONTRE-POIDS DONNÉS.

$$\frac{l}{l'+c}\cdot\frac{1200+p}{1200+P}\cdot\frac{l''}{l} + \log\frac{l-l''+c}{c} = (1+\delta)k' - \frac{l}{l'+c}\cdot\frac{(1+\delta)f'+f''+11535\delta}{1200+P}.$$

Condition qui fixe la clôture du robinet d'injection, ou la valeur de $\frac{l''}{l}$.

DÉTENTE, OU CONTRE-POIDS, QUI PRODUISENT LE MAXIMUM ABSOLU D'EFFET UTILE.

$$\frac{l'}{l} = \frac{1}{1+\delta}\cdot\frac{1200+p+(1+\delta)f'+f''+11535\delta}{1200+P}.$$

Détente approximative du maximum absolu d'effet utile.

$\Pi = 11535 + \rho' + f' - \frac{l'+c}{l}k'(1200+P)$. . . . Contre-poids correspondant, en kilogrammes, par mètre carré de la surface du piston.

Si l'on veut appliquer ces formules à la même machine dont nous avons donné plus haut les dimensions en mesures anglaises, on aura d'abord pour les données du calcul :

Diamètre du cylindre, 132.08 centimètres, ou $a = 1.370$ mètre carré.

Course totale du piston, $l = 2.134$ mètres.

Liberté du cylindre, 0.29 de la course utile du piston, ou $c = 0.29\,l$.

Pression absolue de la vapeur dans la chaudière, 1.1596 kilogramme par centimètre carré, ou $P = 11596$ kilogrammes par mètre carré.

Température de condensation, 66.66 degrés centigrades, ce qui donne pour la pression de condensation, 0.2811 kilogramme par centimètre carré, et en tenant compte du ressort de l'air introduit sous le piston, $p = 2987$ kilogrammes par mètre carré.

Vaporisation brute de la chaudière, 0.04247 mètre cube d'eau par minute ; ou, vaporisation effective, la machine étant sans condenseur, $S = 0.02272$ mètre cube d'eau par minute.

Consommation de houille de première qualité dans le même temps, 5.395 kilogrammes, ou N = 5.395.

Contre-poids, 0.0879 kilogramme par centimètre carré de la surface du piston, ou $\Pi = 879$ kilogrammes par mètre carré.

Dans ces conditions, les effets de la machine, d'abord à la vitesse donnée de 25.60 mètres par minute, en conservant le contre-poids désigné, ainsi que la détente $\frac{l'}{l} = 0.90$ et la clôture du robinet d'injection $\frac{l''}{l} = 0.80$; puis, ensuite, en lui donnant la détente, le contre-poids, la clôture du robinet d'injection et la charge les plus favorables, seront ceux des deux tableaux suivans :

Effets de la machine à la vitesse donnée, avec la clôture du robinet d'injection, la détente et le contre-poids fixés.

$$\frac{l'}{l} = 0.90, \quad \frac{l''}{l} = 0.80, \quad \frac{\Pi}{10000} = 0.0879.$$

v.	= 25.60
ar	= 8102
$\frac{r}{10000}$	= 0.591
S.	= 0.02272
E. u.	= 207,400
E. u. ch.	= 46
E. u. 1 k. co.	= 38,444
E. u. 1 m. e.	= 9,128,500
Q. co. pr. 1 ch. . . .	= 0.117
Q. e. pr. 1 ch. . . .	= 0.00049
E. u. ch. pr. 1 k. co.	= 8.54
E. u. ch. pr. 1 m. e.	= 2029

Effets de la machine, avec diverses détentes et avec le contre-poids, la clôture du robinet d'injection et la charge le plus favorables à chacune de ces détentes respectives.

			Maximum absolu d'effet utile.
$\frac{l'}{l}$	= 0.90	... 0.60	... 0.34
$\frac{l''}{l}$	= 0.77	... 0.69	... 0.65
$\frac{\Pi}{10000}$	= −0.041	... 0.040	... 0.210
v'	= 24.30	... 35.34	... 57.16

ar^1. . . . . =	8902	... 7557	... 5096
$\frac{r^1}{10000}$ . . . . . . =	0.650	... 0.552	... 0.372
S. . . . . =	0.02272	... 0.02272	... 0.02272
E. u. . . . . =	216,300	... 267,090	... 291,270
E. u. ch. . . . . . =	48	... 59	... 65
E. u. 1 k. co. . . . =	40,093	... 49,508	... 53,990
E. u. 1 m. e. . . . =	9,520,300	... 11,755,800	... 12,820,000
Q. co. pr. 1 ch. . . =	0.112	... 0.091	... 0.083
Q. e. pr. 1 ch. . . =	0.00047	... 0.00038	... 0.00035
E.u. ch. pr. 1 k. co. =	8.91	... 11.00	... 12.00
E. u. ch. pr. 1 m. e. =	2116	... 2612	... 2849

Pour les conséquences à tirer de ces résultats, nous renvoyons à ce qui a été dit relativement aux mêmes calculs en mesures anglaises.

APPENDICE.

Courtes notions destinées aux personnes peu familiarisées avec les signes algébriques, et propres à leur rendre clair et facile l'usage des formules contenues dans l'ouvrage.

Parmi les personnes qui s'occupent de la confection ou de la conduite des machines à vapeur, et que cet ouvrage peut intéresser par conséquent, il en est un grand nombre qui sont peu familiarisées avec les termes algébriques, et qui renoncent ordinairement à la lecture d'un livre aussitôt qu'elles le voient s'éloigner des notions arithmétiques. Lorsqu'on veut rendre la lecture d'un ouvrage profitable à ces personnes, il est d'usage de faire suivre chacune des formules définitives de l'explication en toutes lettres des opérations arithmétiques qu'elle représente.

Avec le nombre de formules que contient cet ouvrage, un tel procédé deviendrait à-peu-près impraticable, car l'explication de chaque série de formules exigerait un nombre de pages considérable. Nous croyons donc pouvoir y suppléer avec avantage en donnant ici la signification de chacun des signes employés dans les formules, c'est-à-dire en expliquant quelles sont les opérations arithmétiques qui sont représentées par ces signes. Avec un très-petit nombre de notions à cet égard, les personnes que cet article peut intéresser trouveront que la lecture des formules est tout aussi facile en signes algébriques qu'écrites en toutes lettres, puisque ce n'est, après tout, qu'une manière abrégée d'exprimer les mêmes choses, et que, de plus, les opérations à faire pour arriver au résultat sont bien plus claires et bien plus faciles à saisir. D'un autre côté, la connaissance de la signification des signes en usage ne peut exiger que quelques heures d'attention, et une fois qu'on en sera maître, on se trouvera en état de lire non seulement les formules de cet ouvrage, mais toutes celles qui pourront se présenter dans des ouvrages différens. Nous croyons donc rendre un véritable service aux praticiens en ajoutant ici les courtes notions qu'on va lire.

A, B,..., a, b,..., l, m, n,..., etc ; α, β, etc. Les lettres sont une manière abrégée d'écrire les quantités ou nombres sur lesquels on veut indiquer divers calculs à exécuter. Ainsi, par exemple, dans le deuxième chapitre de cet ouvrage, pour trouver le volume de la vapeur sous une pression donnée, on fait usage du nombre 3,875,970 ; de même, en mesurant la surface du piston d'une machine, on peut trouver qu'elle a pour mesure 14.756 pieds carrés. Dans ce cas et dans d'autres semblables, il serait fort incommode de répéter continuellement ces nombres et de les inscrire à chaque instant, pour indiquer les calculs auxquels on doit les soumettre. Mais si l'on remplace temporairement le premier par m et le second par a, qui sont des expressions très-courtes, les raisonnemens et les calculs se trouvent considérablement simplifiés et deviennent bien plus faciles à suivre. Ensuite, quand on veut exécuter arithmétiquement les calculs indiqués, il n'y a qu'à se rappeler que les lettres m et a représentent les nombres 3,875,970 et 14.756, et en effectuant avec ces nombres les opérations numériques exprimées dans les formules, on arrivera au résultat numérique cherché.

Les lettres ont, de plus, l'avantage de représenter les calculs à exécuter sous une forme tout-à-fait générale, et de manière à se prêter immédiatement à toutes les applications pratiques. En effet, supposons qu'une formule, ou règle, exprime que, pour connaître la charge d'une machine, il faut exécuter certaines opérations arithmétiques sur les quantités exprimées par les lettres a, l, P,..., qui représentent l'aire du cylindre, la course du piston, la pression de la vapeur, etc. ; il est clair que, si l'on veut d'abord connaître la charge d'une première machine, on n'aura qu'à remplacer les lettres par les nombres qui expriment l'aire du cylindre, la course du piston et la pression de la vapeur dans la machine considérée, et qu'en effectuant avec ces nombres le calcul indiqué, on obtiendra la charge cherchée. Mais si, un moment après, on veut résoudre la même question pour une seconde machine, on ne sera pas obligé, comme en arithmétique, de reprendre pas à pas le premier calcul, en le décomposant pour l'imiter ; mais on recourra simplement encore à la formule, et en y remplaçant maintenant les lettres par la valeur qu'elles ont dans la seconde machine, on en déduira encore, et avec la même facilité, la charge qu'elle doit avoir. Rien n'est donc plus court, plus simple et plus commode que l'emploi des lettres, et c'est ce qu'on reconnaitra facilement dès qu'on aura essayé d'en faire usage.

= . . . . Ce signe signifie *égale;* il exprime qu'une quantité que l'on cherche est égale au nombre résultant de certaines opérations effectuées sur d'autres quantités connues. Ainsi, par exemple, si l'on trouvait l'expression

$$V = 60\, v,$$

cela signifierait que la quantité V est égale à 60 fois la quantité v. Par conséquent, si l'on savait d'ailleurs que la lettre v représente le nombre 100, il s'ensuivrait que la quantité inconnue V aurait pour valeur 60 fois 100, ou 6,000.

$+$ .... Ce signe signifie *plus*. Placé entre deux lettres ou deux nombres, il indique qu'on doit les ajouter ensemble. Si, par exemple, on trouve dans une formule une expression de la forme

$$1 + \delta,$$

cela veut dire qu'au nombre 1 il faut ajouter le nombre δ. Si donc on sait d'ailleurs que la lettre δ représente le nombre 0.14, il s'ensuivra que l'expression $1 + \delta$ aura pour valeur

$$1 + \delta = 1 + 0.14 = 1.14.$$

$-$ .... Ce signe indique *moins*. Ainsi, lorsqu'on trouve une expression de la forme

$$P - f - 2118,$$

cette expression revient à indiquer que du nombre P il faut retrancher successivement le nombre f et 2118. Si donc on sait que la lettre P représente le nombre 7848, et que la lettre f représente le nombre 226, l'expression cherchée aura pour valeur

$$P - f - 2118 = 7848 - 226 - 2118 = 5504.$$

$\times$ .... Ce signe remplace les mots *multiplié par*. Ainsi, l'expression

$$a \times v$$

indique que les deux nombres représentés par les lettres a et v doivent être multipliés l'un par l'autre, et le produit de cette multiplication sera la quantité exprimée ici par $a \times v$. Cette multiplication à effectuer s'exprime également en séparant les lettres par un point, ou en les écrivant simplement à la suite les unes des autres, sans aucune interposition de signe ; de sorte que les expressions

$$a \times v...., \quad a.v...., \quad av,$$

reviennent au même et expriment toutes trois le résultat de la multiplication des nombres représentés par a et v. Si, par exemple, on trouve une expression telle que la suivante

$$arv,$$

et que l'on sache que la lettre a exprime le nombre 1.3963, la lettre r le nombre 3194.2, et la lettre v le nombre 170, l'expression arv aura pour valeur

$$arv = 1.3963 \times 3194.2 \times 170 = 758{,}200.$$

÷ . . . . Ce signe remplace les mots *divisé par*. Ainsi l'expression

$$\frac{S}{a}$$

exprime S divisé par a, ou le quotient résultant de la division du nombre exprimé par S, par le nombre exprimé par a.

Par exemple, si l'on a $S = 0.378$ et $a = 1.396$, il est clair que le terme $\frac{S}{a}$ aura pour valeur

$$\frac{S}{a} = \frac{0.378}{1.396} = 0.2707.$$

Une fraction peut avoir son numérateur ou son dénominateur composé de plusieurs nombres, sur lesquels diverses opérations sont indiquées. Il faut alors exécuter d'abord ces opérations, de manière à réduire le numérateur et le dénominateur à un seul nombre, avant d'effectuer la division de l'un par l'autre, comme on l'a dit plus haut.

Si, par exemple, on a la fraction

$$\frac{4,140,950}{620 + P},$$

et que l'on sache d'ailleurs que la lettre P représente le nombre 7848, on ajoutera d'abord le nombre 620 au nombre 7848; ce qui donnera pour résultat le nombre 8468, qui représentera, comme on le voit, le dénominateur de la fraction. Celle-ci pourra donc dès lors être écrite sous la forme

$$\frac{4,140,950}{8468},$$

et elle se réduira, par conséquent, à indiquer le simple quotient de deux nombres, comme précédemment.

Si l'on trouve deux fractions séparées par le signe de l'addition, celui de la soustraction ou celui de la multiplication, cela signifie qu'après avoir cherché séparément le quotient indiqué par chacune de ces fractions, il faut, soit les ajouter ensemble, soit les retrancher, soit les multiplier l'une par l'autre. Ainsi l'expression

$$\frac{S}{a} \cdot \frac{4,140,950}{620 + P}$$

exprime qu'après avoir cherché le quotient indiqué par chacune des deux fractions, il faudra multiplier le premier de ces quotiens par le second. En supposant toujours aux lettres les mêmes valeurs numériques que précédemment, le produit des deux fractions serait ici le nombre définitif 132.41.

Il en serait de même, si l'on trouvait deux fractions divisées l'une par l'autre. On réduirait d'abord chacune d'elles à un seul nombre, en prenant le quotient qu'elles représentent; puis on diviserait les deux quotiens l'un par l'autre.

( ) ou [ ] ou { }. La parenthèse indique que les diverses quantités qu'elle comprend doivent être d'abord réduites à un seul nombre avant d'effectuer les autres opérations indiquées dans la formule.

Ainsi, par exemple, si l'on trouve dans une formule l'expression

$$(1 + \delta)\, v,$$

cela veut dire que c'est l'expression $(1 + \delta)$ tout entière qui doit être multipliée par v. Il faut donc former d'abord la somme $1 + \delta$, et la multiplier ensuite par le nombre v; tandis que si l'on avait seulement

$$1 + \delta v,$$

cela voudrait dire qu'il faut former le produit δv, et y ajouter ensuite le nombre 1.

Il peut se rencontrer plusieurs parenthèses comprises les unes dans les autres, mais leur signification est toujours la même. Si l'on a l'expression

$$a\,[250 + p + f' + (1 + \delta)\, f''],$$

cela signifie qu'il faut d'abord former la somme $(1 + \delta)$, puis la multiplier par f''; ensuite, ajouter à ce qui produit les quantités 250, p et f', ce qui donne le nombre représenté par la grande parenthèse; et enfin, multiplier ce dernier nombre par la quantité a.

Enfin, lorsqu'on trouve dans les formules une lettre surmontée d'un chiffre ou *exposant*, c'est la même chose que d'écrire cette lettre autant de fois de suite qu'il y a d'unités dans le chiffre ou exposant.

Par exemple, l'expression

$$v^2$$

remplace l'expression $v \times v$, ou v écrit deux fois de suite; c'est-à-dire que c'est le produit de v par lui-même ou son carré. Si donc, on savait que $v = 300$, la quantité représentée par v^2 serait

$$v^2 = 300 \times 300 = 90{,}000.$$

Ces courtes explications sont tout ce qu'il faut pour lire et comprendre parfaitement toutes les formules contenues dans cet ouvrage. En remplaçant chacun des signes qu'on verra dans une formule par la périphrase que ce signe représente, on lira la formule telle qu'elle doit être exprimée, et en effectuant ensuite les opérations arithmétiques indiquées par ces signes, on parviendra au résultat cherché. Une formule n'est

donc qu'une manière abrégée d'écrire la suite des opérations à exécuter pour parvenir au résultat dont on a besoin.

Nous ferons suivre cette explication de quelques exemples que nous prendrons parmi les formules pratiques des machines à haute pression (p. 191).

I. Supposons qu'on ait la formule

$$v = \frac{S}{a} \cdot \frac{4{,}140{,}950}{2738 + (1 + \delta) r + f},$$

qui est destinée à faire connaître la valeur inconnue de v; et supposons que l'on sache, en outre, que les lettres comprises dans cette formule ont la valeur suivante (p. 190 et 192):

$$S = 0.378,$$
$$a = 1.396,$$
$$\delta = 0.14,$$
$$r = 3194,$$
$$f = 226.$$

On formera d'abord la somme $(1 + \delta)$ indiquée dans la parenthèse; ce sera

$$1 + \delta = 1.14.$$

Ensuite, on multipliera ce nombre par r ou 3194, et l'on obtiendra pour résultat

$$(1 + \delta) r = 1.14 \times 3194 = 3641.$$

Enfin, on y ajoutera les nombres 2738 et f ou 226, et l'on aura, par conséquent,

$$2738 + (1 + \delta) r + f = 6605.$$

Ce sera donc le dénominateur de la fraction qui forme la seconde partie de la formule. En effectuant la division du nombre 4,140,950 par le nombre qu'on vient d'obtenir il y a un instant, le quotient sera

$$\frac{4{,}140{,}950}{2738 + (1 + \delta) r + f} = \frac{4{,}140{,}950}{6605} = 627.$$

D'un autre côté, en divisant S par a, ou les nombres 0.378 et 1.396 l'un par l'autre, on a la valeur de la fraction $\frac{S}{a}$, savoir,

$$\frac{S}{a} = \frac{0.378}{1.396} = 0.2707.$$

En multipliant donc enfin ce dernier quotient par celui qu'on a obtenu un peu plus haut on aura définitivement

$$v = \frac{S}{a} \cdot \frac{4{,}140{,}950}{2738 + (1 + \delta) r + f} = 0.2707 \times 627 = 170.$$

Ainsi, on voit qu'en effectuant successivement la série de calculs indiqués par le peu de si-

gnes que nous avons expliqués précédemment, et en procédant graduellement des termes les plus simples à ceux qui sont plus composés, on arrivera sans peine au résultat définitif.

Nous donnerons encore quelques autres exemples de ces calculs; mais, au lieu d'effectuer les opérations, nous nous bornerons à exprimer en toutes lettres la signification de la formule, ce qui revient au même, et c'est alors qu'on reconnaîtra combien il est plus simple de représenter des calculs par une formule que de les exprimer par une *règle* écrite.

II. Supposons que l'on ait la formule

$$ar = 4{,}140{,}950 \frac{S}{(1+\delta)v} - \frac{a}{1+\delta}(2738 + f),$$

cela signifiera qu'on arrivera à la valeur cherchée de ar, en effectuant les opérations arithmétiques suivantes :

Ajoutez à l'unité le nombre représenté par la lettre δ, et multipliez cette somme par le nombre v.

Puis divisez le nombre S par le produit ainsi obtenu, multipliez le quotient de cette division par le nombre 4,140,950, et écrivez à l'écart ce premier résultat partiel, qui représente le premier terme de la formule.

Ensuite, ajoutez encore à l'unité le nombre δ, et divisez par cette somme le nombre a.

De même, ajoutez au nombre 2738 le nombre f, et multipliez la somme ainsi obtenue par le quotient précédent; puis mettez encore à l'écart ce second résultat partiel, qui représente le second terme de la formule.

Enfin, du premier résultat partiel retranchez le second, et la différence sera la quantité cherchée ar.

En effectuant ces diverses opérations avec les valeurs de S, a, δ, r et f, données plus haut, et supposant de plus le cas où la lettre v aurait la valeur $v = 170$, on trouve que la quantité cherchée ar aura pour valeur définitive

$$ar = 4460.$$

III. Si l'on a la formule

$$S = av\,\frac{2738 + (1+\delta)r + f}{4{,}140{,}950}.$$

cette formule reviendra à l'explication arithmétique suivante :

Au nombre 1 ajoutez le nombre δ, et multipliez la somme par le nombre r.

A ce produit ajoutez le nombre f et le nombre 2738.

Puis, divisez la somme ainsi obtenue par le nombre 4,140,950, et le quotient exprimera la valeur de la fraction comprise dans le second membre de la formule.

Ensuite, multipliez le nombre a par le nombre v, et multipliez le produit résultant par le quotient obtenu dans l'opération précédente. Le produit définitif sera la valeur cherchée de S.

Pour les valeurs attribuées précédemment aux différentes lettres comprises dans la formule, le résultat du calcul donnera $S = 0.378$.

IV. Si l'on a la formule

$$v' = \frac{S}{a} \cdot \frac{4,140,950}{620 + P},$$

elle reviendra à la paraphrase suivante :

Au nombre 620 ajoutez le nombre P ; divisez par la somme ainsi obtenue le nombre 4,140,950, et inscrivez à part le quotient de cette division.

Ensuite, divisez le nombre S par le nombre a, ce qui vous donnera un second quotient.

Enfin, multipliez le premier quotient par le second, et le produit résultant sera la valeur cherchée de v'.

Avec les valeurs déjà indiquées pour les lettres, et de plus, pour $P = 7848$, le résultat de la formule précédente donnera $v' = 132$.

V. Enfin, si l'on a la formule

$$ar' = \frac{a}{1 + \delta}(P - f - 2118),$$

il est clair qu'elle signifiera ce qui suit :

Du nombre P retranchez d'abord le nombre f, et ensuite, retranchez encore du reste le nombre 2118.

Ensuite, au nombre 1 ajoutez le nombre δ, et divisez le nombre a par la somme ainsi obtenue.

Enfin, multipliez ce quotient par la différence obtenue précédemment, et le produit définitif ainsi formé sera la valeur cherchée de ar'.

Les opérations ainsi indiquées, pour le cas où les lettres ont les valeurs déjà données plus haut, produisent, pour la valeur cherchée de ar', la quantité $ar' = 6754$.

On voit, par ces exemples, combien il est facile de remplacer les formules par leur expression en toutes lettres, et, par conséquent, la vue des signes algébriques ne doit nullement arrêter les personnes peu familiarisées avec l'algèbre.

FIN.

